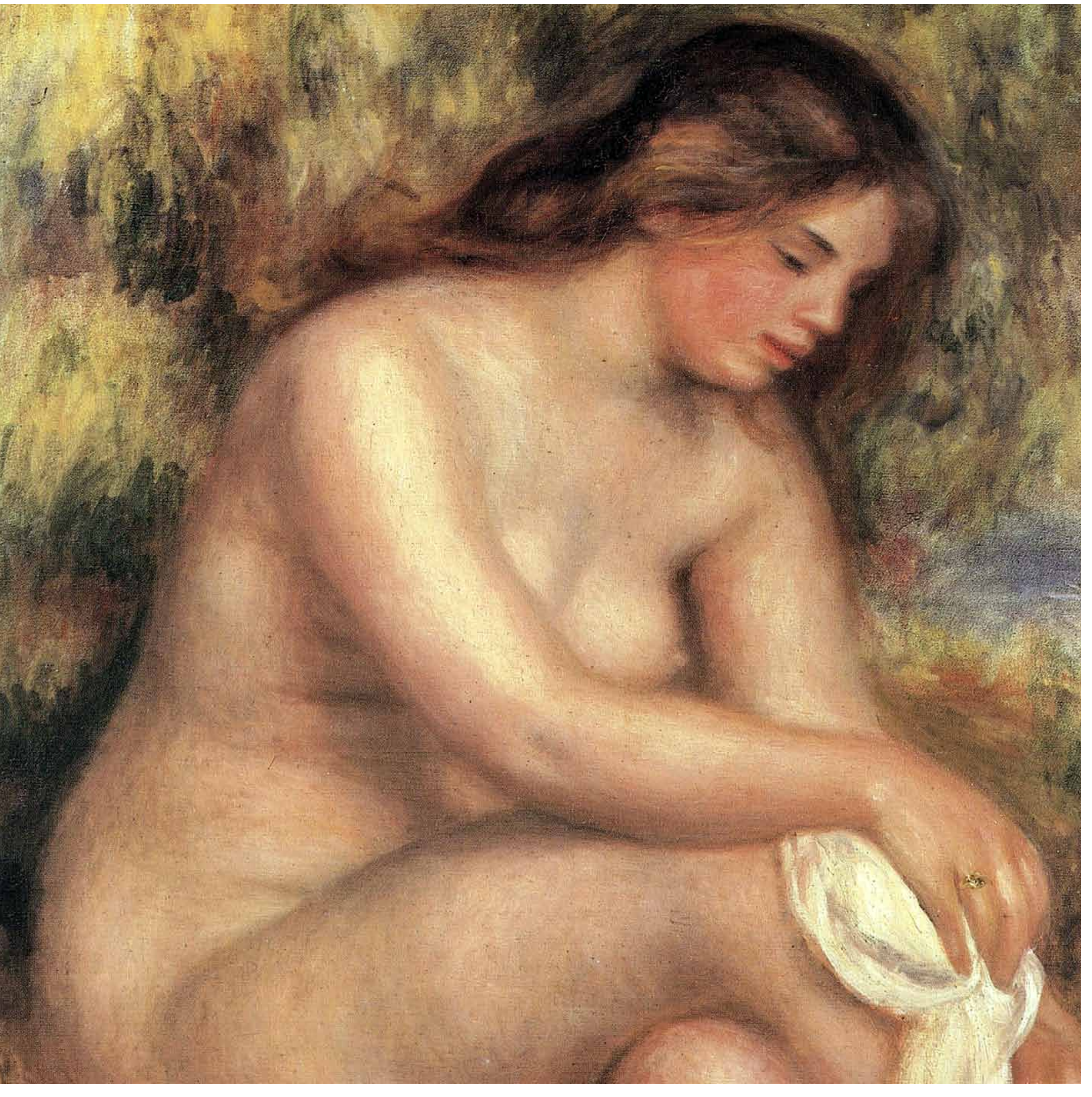
INVESTIGACION Y CIENCIA

Edición en español de SCIENTIFIC AMERICAN



OBESIDAD Y FERTILIDAD

Mayo 1988

450 PTAS.

Copyright © 1988 Prensa Científica S.A.

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa

Apuntes

La salinidad del suelo y de las aguas de riego limita la producción de los cultivos e impide la expansión agrícola hacia zonas abandonadas o infrautilizadas en el presente. En España, la cuenca del río Ebro sufre especialmente ese problema con más de 300.000 hectáreas de suelo afectado por sales y un agua de riego de baja calidad. ¿Solución? Mejorar las técnicas de riego, cultivo y drenaje y promover cultivares tolerantes de la salinidad.

Se ha presentado el Plan Nacional de Investigación Científica y Desarrollo Tecnológico, de cuatro años de duración y un presupuesto de 634.171 millones de pesetas. Se articula en programas nacionales, programas sectoriales y programas de comunidades autónomas. Alguien echará de menos, entre otras omisiones, la investigación básica en neurología o biología del desarrollo, dos campos por lo demás muy nuestros, aquél de ayer y éste de hoy.

Hay que modificar al alza la potencia cancerígena de las dosis radiactivas. Lo que sabemos hoy sobre los efectos biológicos de las radiaciones se funda en las pruebas realizadas con algunos de los supervivientes de Nagasaki e Hiroshima. Pero se acaba de descubrir que esas poblaciones recibieron la mitad de la radiación supuesta; dicho de otra manera: hay que multiplicar por dos el riesgo de contraer cáncer por radiaciones gamma.

Primero fue Gödel, quien demostró que en el seno de un sistema formal de aritmética había teoremas que no podían demostrarse y proposiciones cuya verdad era indecidible. Ahora Gregory Chaitin acaba de poner la guinda demostrando que la estructura lógica de la aritmética puede ser aleatoria.

Se ha conseguido otro récord en la superconductividad a altas temperaturas. Paul Grant, del laboratorio de IBM en Almaden (California), ha provocado la resistencia nula al paso de la corriente en un óxido de talio-bario-calcio-cobre a 125 K. Ese valor supera en 20 grados el último récord registrado.

Se desconocen muchos aspectos de la epidemiología del SIDA, debido, en buena parte, al carácter asintomático del síndrome: aparece tras un largo proceso de incubación. Si dejamos de lado los grupos de alto riesgo (homosexuales varones y heroinómanos), su probabilidad de transmisión cae por debajo de las demás enfermedades infecciosas de origen venéreo.

Investigadores de la compañía BASF en Ludwigshafen acaban de sintetizar un polímero —un poliacetileno especial— que conduce la electricidad mejor que el cobre y la plata, los conductores industriales idóneos a temperatura ambiente. Entre las aplicaciones que se le han buscado se citan la protección antiestática, el blindaje electromagnético, dispositivos electrocromos y muchas más.

El roce de la madre con su prole promueve la síntesis de las proteínas del desarrollo. El experimento se ha llevado a cabo con ratones. En los humanos, se ha corroborado que el roce madre-hijo facilita el aumento de peso corporal del bebé y el desarrollo normal de su sistema nervioso.

Durante la última parte del Pleistoceno, que transcurrió desde hace dos millones a 10.000 años, desapareció la mitad de los grandes mamíferos. La extinción animal de la edad de los hielos fue proporcional al peso de las víctimas: desaparecieron de América, Asia y Europa todas las especies que pesaban más de 1000 kilos; tres cuartas partes de los herbívoros con peso de 100 a 1000 kilogramos; un 41 por ciento de las que pesaban de 5 a 100 kilogramos y un 2 por ciento de las que no llegaban a los cinco kilos.

Desde que en 1957 se sugirió la existencia de ritmos circadianos en la actividad fotosintética del fitoplancton se ha confirmado en distintas observaciones, la última en un tanque artificial. Las oscilaciones de las características fotosintetizadoras parecen depender de un ritmo circadiano endógeno.

INVESTIGACION Y
CIENCIA
Mayo de 1988 Número 140

SECCIONES

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Ramón Pascual: *Gravedad y antimateria*; Mercedes Campillo: *Anticuerpos catalíticos*; Juan-Pedro Adrados: *Grúas de construcción*; Manuel Ruíz Rejón: *Las manchas del leopardo*; Ana García García: *Obesidad y fertilidad*; Amando García Rodríguez: *El dispositivo de efecto cuántico, ¿transistor del mañana?*; Jaime Alvar: *El puerto romano de Cosa*; Luis Bou: *Juegos de ordenador*; J. Vilardell: *Taller y laboratorio*.

Ciencia y sociedad:

J. L. Sanz

Libros:

Emiliano Aguirre, M. Carmen Rusiñol, Claudi Mans y Javier Echevarría

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
15-21	Instituto de Paleontología de Sabadell
22-23	Museo La Specola de Zoología, Florencia (Scala/Art Resource)
24	Lawrence Berkeley Laboratory
25-30	George Retseck
33	Arthur J. Olson
34	Elizabeth D. Getzoff y John A. Tainer
35	Elizabeth D. Getzoff y John A. Tainer (*arriba*), Michael E. Pique, Elizabeth D. Getzoff y John A. Tainer (*abajo*)
36-37	Andrew Christie
38	Andrew Christie (*arriba*), Arthur J. Olson (*abajo*)
39	Andrew J. Christie
40	Michael E. Pique
49	Laurie Burnham
50-55	Hank Iken
60	Bruce Coleman Inc./ G. Harrison
62	Patricia J. Wynne
63	Animals Animals (*izquierda*), Patricia J. Wynne (*derecha*)
64	James D. Murray (*arriba*), Patricia J. Wynne (*abajo*)
65	Avi Baron y Paul Munro (*arriba*), Patricia J. Wynne (*abajo*)
66	Bruce Coleman Inc./ Hans Reinhard (*abajo, a la izquierda*), Animals Animals (*arriba, a la derecha*), Patricia J. Wynne (*abajo*)
67	Charles M. Vest y Youren Xu
69	Museo de Historia Natural de Viena
70-71	Bob Conrad
72-73	Carol Donner
75	Peter C. Ortner
79-82	George V. Kelvin
85	Anna Marguerite McCann
86-87	Tom Prentiss
88	Anna Marguerite McCann
89	Tom Prentiss (*arriba*); Barbara Bini, Academia Americana en Roma (*abajo*)
90	Tom Prentiss
92	John P. Oleson
94	James F. Blinn
95-96	Edward Bell
97	James E. Loyless
100-103	Michael Goodman



LA PORTADA muestra un detalle de la obra de Auguste Renoir "Bañista sentada secándose la pierna", que se engloba en la corriente del arte tradicional que asocia la obesidad con la belleza femenina. Se está comprobando ahora que esa relación no está exenta de cierto sentido biológico (véase "Obesidad y fertilidad", por Rose E. Frisch, en este mismo número). Las mujeres deben almacenar una cantidad no despreciable de grasa en su organismo para mantener su capacidad reproductora. La grasa desempeña un papel regulador e influye en el inicio y la regularidad de los ciclos menstruales.

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
DIRECTOR EDITORIAL José María Valderas Gallardo
REDACCIÓN Carlos Oppenheimer, Josep Maria Farré Josa
PRODUCCIÓN César Redondo Zayas
PROMOCIÓN EXTERIOR Pedro Clotas Cierco
EDITA Prensa Científica, S. A. Calabria, 235-239 - 08029 Barcelona (ESPAÑA)

SCIENTIFIC AMERICAN

DIRECTOR EDITORIAL Jonathan Piel
REDACCIÓN Armand Schwab, Jr. (Subdirector), Timothy Appenzeller, Timothy M. Beardsley, John M. Benditt, Laurie Burnham, David L. Cooke, Jr., Ari W. Epstein, Gregory R. Greenwell, John Horgan, June Kinoshita, Ricki L. Rusting, Karen Wright
DIRECTOR ARTÍSTICO Samuel L. Howard
DIRECTOR DE PRODUCCIÓN Richard Sasso
PRESIDENTE HONORARIO Gerard Piel

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Calabria, 235-239
08029 Barcelona (España)
Teléfono 322 05 51 ext. 33-37

Precios de suscripción, en pesetas:

	Un año	Dos años
España	4950	9000
Extranjero	5500	10.000

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 450 pesetas
Extraordinario: 575 pesetas

– Todos los precios indicados incluyen el IVA, cuando es aplicable.
– En Canarias, Ceuta y Melilla los precios incluyen el transporte aéreo.
– El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA
Carretera de Irún, km. 13,350
(Variante de Fuencarral)
28049 Madrid Tel.652 42 00

para los restantes países:

Editorial Labor, S. A.
Calabria, 235-239 - 08029 Barcelona
Teléfono 322 05 51

PUBLICIDAD

Madrid: Gustavo Martínez Ovín
Menorca, 8, bajo, centro, izquierda.
28009 Madrid
Teléfonos 409 70 45 - 409 70 46
Cataluña:
Paulino Muñoz Victoria
Muntaner, 467-469, 3º 3ª
08021 Barcelona
Teléfono 211 92 45



Copyright © 1988 Scientific American Inc., 415 Madison Av., New York N. Y. 10017.
Copyright © 1988 Prensa Científica S. A. Calabria, 235-239 - 08029 Barcelona (España)

Reservados todos los derechos. Prohibida la reproducción en todo o en parte por ningún medio mecánico, fotográfico o electrónico, así como cualquier clase de copia, reproducción, registro o transmisión para uso público o privado, sin la previa autorización escrita del editor de la revista. El nombre y la marca comercial SCIENTIFIC AMERICAN, así como el logotipo distintivo correspondiente, son propiedad exclusiva de Scientific American, Inc., con cuya licencia se utilizan aquí.

ISSN 0210-136X Dep. legal: B. 38.999-76

Fotocomposición: Tecfa. Línea Fotocomposición, S.A. Almogàvers, 189 - 08018 Barcelona

Fotocromos reproducidos por Reprostudy, S. A. Buenos Aires, 51 - 08902 Hospitalet (Barcelona)

Gráfica Elzeviriana, S. A. Nápoles, 249 - Tel. 207 40 11 - 08013 Barcelona

Printed in Spain - Impreso en España

Los autores

JORDI AGUSTI ("El Vallesiense") dirige el Instituto de Paleontología M. Crusafont de la Diputación de Barcelona. Biólogo de formación, ha dedicado la mayor parte de su tiempo al estudio de los Vertebrados del Neógeno y Cuaternario ibéricos, especialmente en lo que a las sucesiones de micromamíferos fósiles se refiere. Doctor en ciencias por la Universidad de Barcelona, desde muy joven mantuvo un estrecho contacto con el profesor Miguel Crusafont, a quien debe buena parte de su formación como paleontólogo. En la actualidad, imparte diversos cursos de doctorado y postgrado relacionados con la paleobiología continental y trabaja en el desarrollo de varios proyectos sobre sucesiones de mamíferos en el Terciario español.

TERRY GOLDMAN, RICHARD J. HUGUES y MICHAEL MARTIN NIETO ("Gravedad y antimateria") son físicos teóricos del Laboratorio Nacional estadounidense de Los Alamos. Goldman se doctoró por la Universidad de Harvard en 1973 y realizó trabajos de postdoctorado en el Centro del Acelerador Lineal de Stanford y en Los Alamos. Fue becario del Instituto de Tecnología de California (Caltech) desde 1978 hasta 1980, cuando se incorporó a la plantilla de Los Alamos. En la actualidad trabaja en la descripción del confinamiento del color en la cromodinámica cuántica y su aplicación a la física nuclear. Hughes nació en Inglaterra, se licenció en física matemática en 1975 y se doctoró en física teórica de partículas elementales, en 1978, por la Universidad de Liverpool. Desde entonces ha investigado en la Universidad de Oxford, en el Caltech, en la Organización Europea de Investigación Nuclear y en la Universidad de Edimburgo. Se incorporó a Los Alamos en 1985. Nieto, quien ingresó en la Universidad de Cornell con la intención de especializarse en física experimental de altas energías, acabó por trasladarse a la rama teórica. Realizó trabajos de postdoctorado en la Universidad estatal de Nueva York en Stony Brook, en la Universidad de Copenhagen, la de California en Santa Bárbara, la de Kyoto y en la Universidad de Purdue. Se encuentra en Los Alamos desde 1972 y actualmente explora la posible existencia de fuerzas gravitatorias insólitas.

RICHARD A. LERNER y ALFONSO TRAMONTANO ("Anticuerpos catalíticos") son, respectivamente, director y profesor asociado del departamento de biología molecular del Instituto de Investigación de la Clínica Scripps. Lerner, doctorado en medicina en 1964 por la Facultad de Medicina de la Universidad de Stanford, ha trabajado en Scripps desde 1965, salvo los dos años que pasó en el Instituto Wistar de Anatomía y Biología de Philadelphia. Este es su segundo artículo en INVESTIGACIÓN Y CIENCIA. Tramontano, licenciado en 1976 por la Universidad de Columbia, se doctoró en química inorgánica por la de California en Riverside (1980). Comenzó a trabajar en Scripps en 1983, una vez concluida su formación en la Universidad de Harvard.

LAWRENCE K. SHAPIRO y HOWARD I. SHAPIRO ("Grúas de construcción") son hijo y padre. Poseen una empresa familiar de ingeniería: Charles M. Shapiro & Sons, fundada por el abuelo. Lawrence se graduó en ingeniería de caminos por la Universidad de Virginia en 1978, y ha venido proyectando grúas desde 1983. Desempeñó diversas funciones en Zurn Industries, de Tampa, Florida. Howard es ingeniero jefe de grúas. Procede del Instituto Politécnico de Brooklyn, donde se graduó en 1953.

JAMES D. MURRAY ("Las manchas del leopardo") enseña biología matemática y dirige el centro de esa especialidad en la Universidad de Oxford. En 1956 se recibió de doctor en matemática aplicada por la Universidad de St. Andrew, obteniendo en 1968 otro doctorado en ciencias exactas, esta vez por Oxford. De 1961 a 1963 fue profesor visitante y tutor en Oxford. Posteriormente ocupó plaza de profesor de ingeniería mecánica en la Universidad de Michigan, trasladándose en 1967 a la Universidad de Nueva York. Desde 1970 trabaja en la Universidad de Oxford. Murray ha sido profesor visitante de numerosas universidades, incluidas la Nacional de Tsing Hua, Taiwan, y la de Florencia.

ROSE E. FRISCH ("Obesidad y fertilidad") es profesora de demografía de la Escuela de Salud Pública de Harvard. Cursó el primer ciclo unversitario en el Smith College, licenciándose en zoología por la Universidad de Columbia, en 1940, y doctorándose en genética por la de Wisconsin en 1943. Tras su retorno al trabajo, se centró en el estudio de la biología de la reproducción al incorporarse, en 1965, en el Instituto de Estudios Demográficos de Harvard. Entre las investigaciones que realiza actualmente se cuenta el estudio de los efectos a largo plazo del ejercicio sobre la capacidad reproductora y la salud general de la mujer.

ROBERT L. BATE ("El dispositivo de efecto cuántico, ¿transistor del mañana?") es director de la rama de nuevas ideas de la empresa Texas Instruments Incorporated, en la que ha ocupado diversos cargos desde 1964. El grupo que dirige estudia las estructuras de los semiconductores y las arquitecturas revolucionarias a escalas de nanómetros, para aplicar los efectos cuánticos en el desarrollo de una nueva generación de circuitos integrados de alta densidad. En 1955 concluyó en la Universidad de Colorado el primer ciclo de ingeniería física y, en 1957, se licenció en física por la Universidad estatal de Ohio. Antes de ingresar en la Texas Instruments investigó en el Instituto Memorial Battelle.

ANNA MARGUERITE McCANN ("El puerto romano de Cosa"), la primera mujer que se ha dedicado a la arqueología submarina, dirige las excavaciones del puerto de Cosa. Formada en el Wellesley College, se licenció por el Instituto de Bellas Artes de la Universidad de Nueva York y se doctoró por Indiana. Ha desempeñado tareas docentes en el Swarthmore College y en las universidades de Missouri, California en Berkeley y estatal de Nueva York. Empezó a trabajar en Cosa siendo becaria de clásicas de la Academia Americana en Roma. El proyecto Cosa fue financiado por la Fundación Nacional estadounidense de Humanidades. Sus resultados se publicaron, resumidos, en *The Roman Port and Fishery of Cosa* (Princeton University Press, 1987).

Hace...

José M.ª López Piñero

...doscientos años

Antoni Gimbernat i Arbós presentó en una "junta literaria" del Colegio de Cirugía de San Carlos, de Madrid, su disertación sobre un nuevo método de operar la hernia crural, uno de los más célebres textos clásicos de la anatomía topográfica y la técnica quirúrgica.

Nacido en 1734 en la localidad tarraconense de Cambrils, Gimbernat cursó en la Universidad de Cervera lo que hoy llamaríamos estudios secundarios. En 1758 ingresó en el Colegio de Cirugía que diez años antes había fundado Pere Virgili, cabeza del movimiento de reforma de la enseñanza y la técnica quirúrgicas en España. Dicha reforma tuvo como escenarios institucionales el Colegio de Cádiz y los que a imagen suya se crearon más tarde en Barcelona (1760) y Madrid (1787). En el terreno de la enseñanza condujo a la conversión de la cirugía en una profesión de categoría equiparable a la de médico, con la que terminaría fusionándose más adelante; simultáneamente se produjo la constitución de la técnica operatoria y la renovación de los saberes quirúrgicos, en directa relación con el resto de Europa, tal como ha puesto de relieve Juan Riera.

Gimbernat obtuvo el título de cirujano en 1762 y aquel mismo año pasó al nuevo Colegio de Barcelona como encargado de la enseñanza de anatomía. Permaneció en la citada institución durante más de una década, ocupando cargos cada vez más importantes. En 1774, de acuerdo con una de las líneas fundamentales de la política ilustrada de promoción de la actividad científica, fue pensionado para realizar un largo viaje de estudios por el extranjero. Durante cuatro años asistió a cursos y trabajó en hospitales de París, Londres, Edimburgo y Leiden. Pesaron especialmente en su formación las estancias en el Hôtel-Dieu y la Charité, de París, donde estuvo en relación con primeras figuras como Joseph Desault, François Chopart y Antoine Petit, así como en varios hospitales londinenses, en los que conoció a Samuel Sharp y, sobre todo, a John Hunter, el más importante cirujano de la época.

A su regreso a España, Gimbernat fue encargado junto a Mariano Ribas, que había sido su compañero de estudios en el extranjero, de organizar el Colegio de Cirugía, de Madrid. La nueva institución comenzó sus enseñanzas en 1787 y Gimbernat ocupó en ella la cátedra de operaciones, aparte de ser uno de los dos directores. Su carrera profesional culminó en 1789 con el nombramiento de cirujano de cámara del monarca.

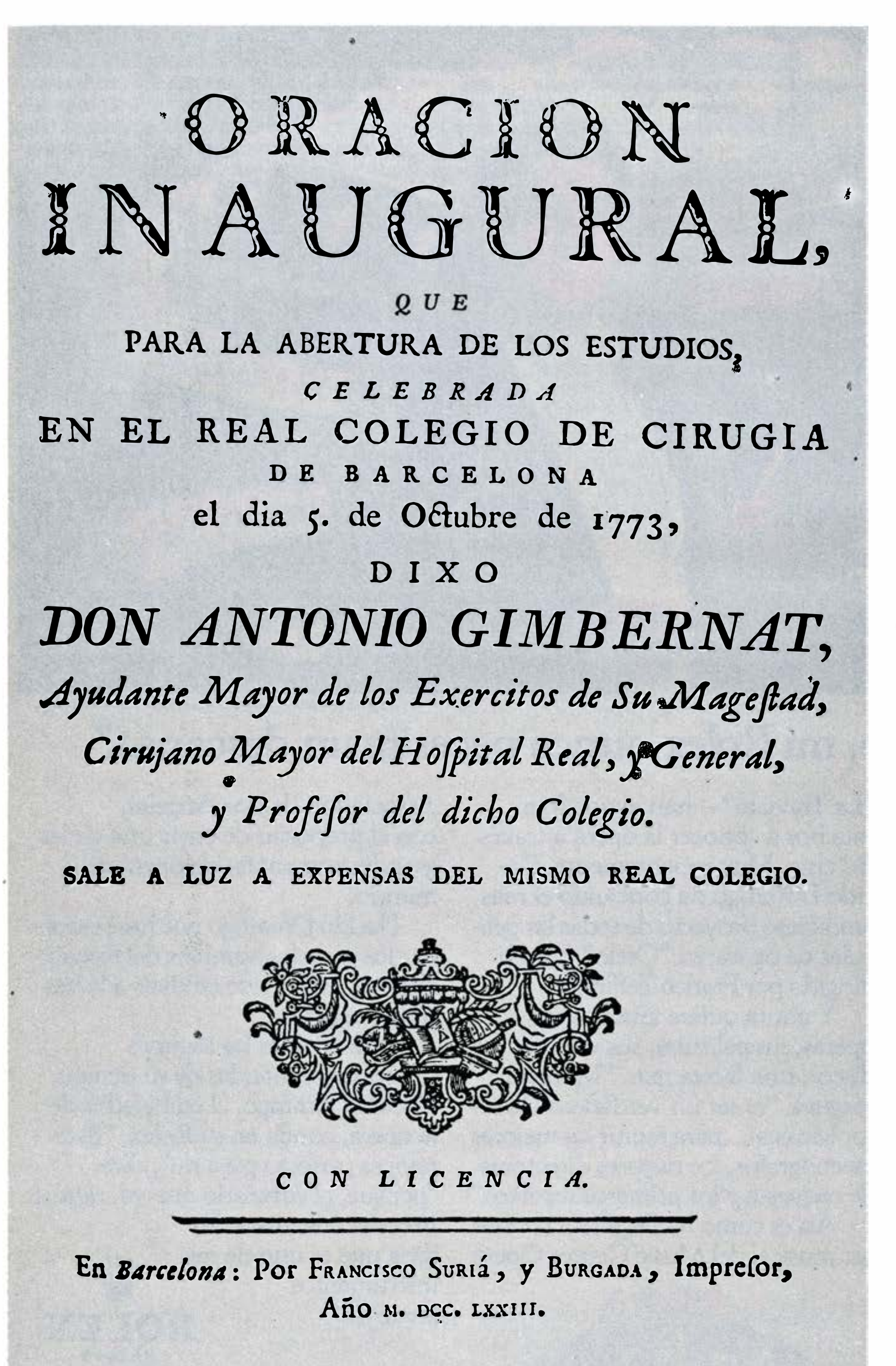
Los últimos años de Gimbernat, como los de tantas otras personalidades científicas españolas de la Ilustración, fueron extremadamente penosos. Durante la guerra de la Independencia, su simpatía por la mentalidad de los afrancesados le llevó a colaborar con el régimen de José Bonaparte, siendo incluso presidente del Consejo Superior de Sanidad Pública. Tras el regreso de Fernando VII fue destituido como los demás "intrusos". Casi ciego, arruinado y mentalmente trastornado, falleció en Madrid el año 1816.

Las principales publicaciones de Gimbernat son "oraciones" y "disertaciones" que presentó en los Colegios de Cirugía, de Barcelona y Madrid. Cabe destacar la dedicada a defender la necesidad del saber anatómico para el cirujano (1773) y las relativas al "recto uso de las suturas" (1787) y a las "úlceras de los ojos que interesan la córnea transparente" (1802). La más importante, sin embargo, es la que leyó en 1788, como hemos adelantado, y que apareció impresa cinco años después con el título de *Nuevo método de operar en la hernia crural*. Tras revisar y criticar las técnicas utilizadas hasta entonces, Gimbernat ofrece en ella un estudio anatómico original de la región inguinal, dentro del cual describe por vez primera el ligamento que hoy lleva universalmente su nombre. Dicho estudio sirve de fundamento al nuevo procedimiento operatorio que expone a continuación y que consta de dos fases, destinada la primera a reintroducir el paquete intestinal prolapsado y, la segunda, a la reconstrucción quirúrgica de la zona.

Se trata de una de las contribuciones más brillantes y famosas del proceso de constitución de la moderna técnica quirúrgica a base de operaciones rigurosamente regladas desde el punto de vista anatómico. No resulta extraña la amplia repercusión del texto de Gimbernat, que fue traducido al inglés, francés, alemán e italiano. Reproducimos a continuación un fragmento de su capítulo anatómico:

"He explicado hasta aquí los métodos de operar en la hernia crural practicados por varios autores, y lo que otros profesores de primera nota han juzgado de ellos y de su utilidad. Por lo que he dicho, notando los defectos de unos y otros, cualquiera comprenderá fácilmente que no hay uno siquiera que no sea arriesgado y expuesto. Ello es que el acierto en la operación es de la mayor importancia por todos conceptos y, por lo mismo, muchas y repetidas veces he pensado que haría un beneficio a la Humanidad, al mismo tiempo que enriquecería la facultad quirúrgica, si, sujetando en esta oportuna ocasión mi nuevo método a la censura de tan sabios y respetables profesores, lograba su aprobación y el consentimiento unánime para adoptarlo en adelante. No me atrevería a proponerlo con tanta confianza si no tuviese a su favor el feliz éxito con que lo puse en práctica en dos mujeres, hallándome en Barcelona por los años de 1772 y 73. Siento que por razón de mis viajes no haya podido acumular mayor número de observaciones; pero el profesor D. José Torner, actual catedrático del Real Colegio de Cirugía de aquella ciudad, que asistió a mis dos operaciones, acaba de comunicarme otras dos más que ha ejecutado siguiendo mi nuevo método: la una, en un hombre de cincuenta y cuatro años, al cual operó en 5 de junio de 1786, y quedó perfectamente curado en 16 del inmediato mes de julio; la otra, en una religiosa de sesenta y ocho años, en 23 de agosto de 1788, logrando cabal curación en 4 del mes de octubre inmediato. Ambos sujetos viven en el día. La religiosa no ha visto más la hernia, ni ha usado más de braguero; el hombre tampoco lo necesitó hasta después de un año, en que, con una fuerza violenta, volvió a quebrarse de la misma parte.

"A más del feliz éxito de estas cuatro operaciones, me anima también a publicar este nuevo método la aprobación del sabio y experto Dr. Hunter; porque cuando fui su oyente en Londres al tiempo que he referido, se lo expliqué, concluida la lección en que se trataba de esta hernia, demostrándolo detenidamente y con la posible claridad en su presencia, y ante algunos de sus discípulos, en las mismas pieza seca y bien preparada de una hernia crural, sobre la cual acababa de hacer una exacta de-


ORACION INAUGURAL, QUE PARA LA ABERTURA DE LOS ESTUDIOS, CELEBRADA EN EL REAL COLEGIO DE CIRUGIA DE BARCELONA el dia 5. de Octubre de 1773, DIXO DON ANTONIO GIMBERNAT, Ayudante Mayor de los Exercitos de Su Mageſtad, Cirujano Mayor del Hoſpital Real, y General, y Profeſor del dicho Colegio.

SALE A LUZ A EXPENSAS DEL MISMO REAL COLEGIO.

CON LICENCIA.

En Barcelona: Por Francisco Suriá, y Burgada, Impreſor, Año M. DCC. LXXIII.

1. Portada de la "oración" de Gimbernat dedicada a defender la fundamentación anatómica de la técnica quirúrgica (1773)

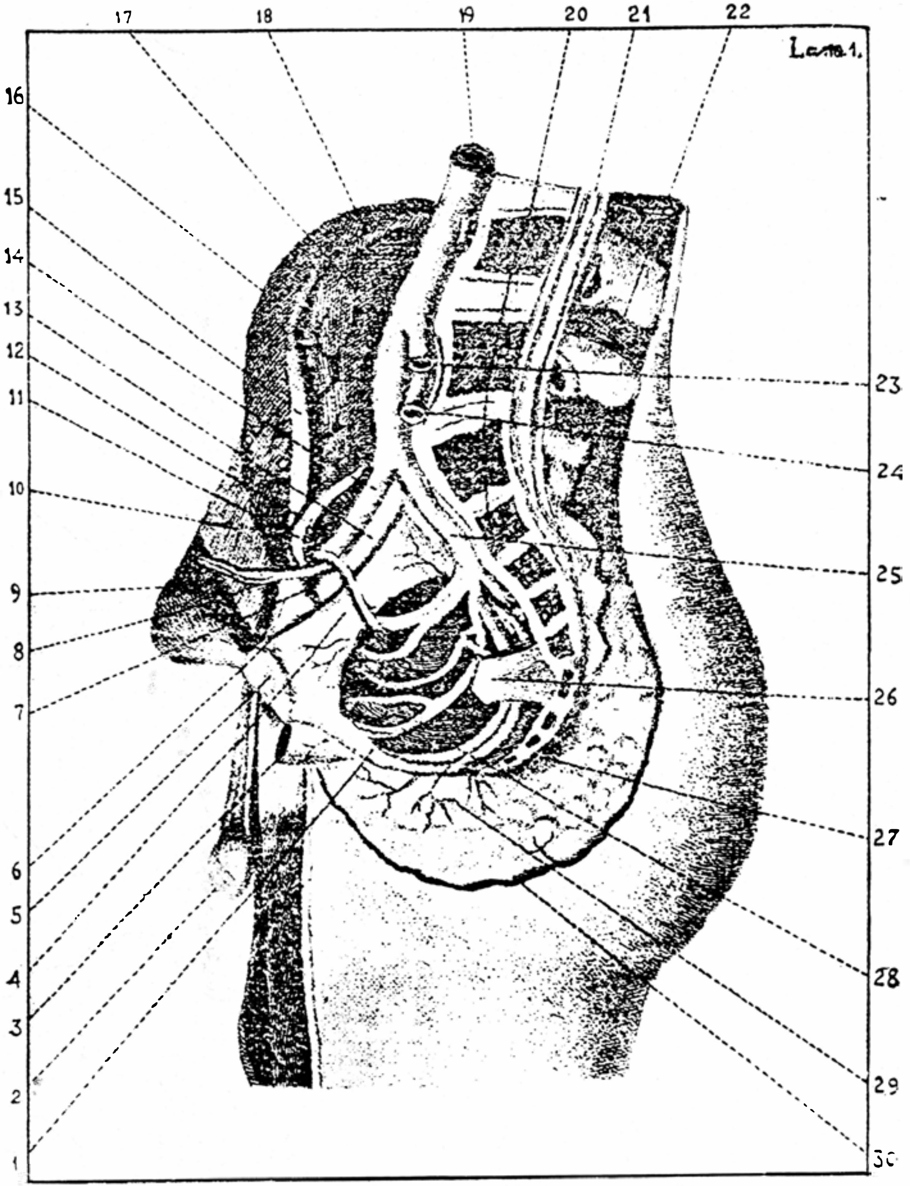
mostración con sabias reflexiones prácticas. Fue grande mi satisfacción al ver que, concluida mi demostración, respondió el mismo Hunter: *You are right, Sir:* Señor, usted tiene razón; y añadió: *Yo lo haré público en mis lecciones y lo practicaré así cuando se me presente ocasión de operar sobre el vivo.* A la verdad que esta sencilla expresión es digna del mayor aprecio, por ser de un profesor de tanto mérito, que conocía muy bien los peligros a que se exponían las facultativos más diestros usando de los métodos hasta ahora inventados y que se desengañó por sí mismo de que ninguna de las contingencias temidas se encontraba en el mío. Si después de tan felices experiencias, y de tan autorizada aprobación, consigo la de un Cuerpo tan respetable cual es esta Junta de maestros y profesores instruidos, me daré por satisfecho plenamente del trabajo que he empleado en discurrir este nuevo método. El se halla libre a mi entender de todos los escollos y fatalidades ya indicados, y es sumamente fácil de practicar, por lo cual me persuado firmemente de que todo profesor que lo experimente y ejecute por sí mismo lo preferirá a cuantos se han dictado hasta ahora.

"Pero como todo su acierto y seguridad dependen de conocer perfectamente la estructura de la parte donde existe la enfermedad, me veo obligado, antes de dictarlo, a hacer una exacta descripción anatómica del arco crural.

"Esta parte del cuerpo humano, sin embargo de ser tan notable, ha sido poco examinada y menos conocida de los anatómicos, hasta que yo la demostré por la primera vez en el año de 1768, que fue uno de los del curso público de Anatomía que enseñé en Barcelona desde 1762 hasta 1774, en que por Real orden emprendí mis viajes a países extranjeros. Ello es certísimo, que sin tener un perfecto conocimiento de esta parte, es imposible operar con seguridad y acierto; además de que tengo por indubitable que el solo haberse ignorado la verdadera estructura de ella ha sido el motivo de tanta variedad de métodos peligrosos, y que por esta razón la Cirugía no ha hecho progreso alguno en la curación de esta enfermedad.

"El músculo oblicuo externo forma en la parte inferior del vientre una fuerte y ancha aponeurosis, cuyas fibras, siendo casi paralelas entre sí, bajan oblicuamente, yendo de fuera adentro, y extendiéndose las más inferiores desde la espina superior anterior del íleon hasta el pubis, donde a poca distancia se abren en dos bandas o pilares para formar el anillo inguinario. En toda esta extensión va doblándose la aponeurosis hacia dentro; este doblez, que es más manifiesto y más expuesto hacia el pubis, forma como un cordón fuerte y blanquecino, que Falopio creyó ser ligamento, y así se ha llamado hasta que últimamente se le ha dado el nombre de arco crural, porque se presenta al principio del muslo con figura, aunque impropia, de una especie de arco. El pliegue aponeurótico que este arco forma deja en su parte interna un canal que, siendo más grande hacia el pubis, aloja los vasos espermáticos, los cuales corren por él un cierto espacio antes de atravesar el anillo inguinario, que es el lugar donde dicho canal termina.

"El arco se halla bastante tenso entre el íleon y el pubis, mediante una expansión del fascialata, que se le une íntimamente en todo su largo, de modo que, si se corta al través dicha expansión, se afloja considerablemente todo el arco. Por debajo pasan, en ambos se-



2. *Grabado del* Nuevo método de operar en la hernia crural *(1793), de Gimbernat, brillante aportación a la técnica quirúrgica. Su texto explicativo es el siguiente:*

"Manifiesta la pelvis partida verticalmente por su medio, las dos últimas vértebras lumbares, la nalga y una porción de muslo con sus tegumentos. Esta media pelvis, que es del lado derecho, está representada por la parte interior, para la más clara inteligencia.

1. Ramo inferior del pubis.
2. Testículo, con su cordón espermático, quitado el cutis.
3. Corte del cuerpo cavernoso.
4. Ramo superior del pubis.
5. Sífilis del pubis.
6. Doblez o pliegue del arco crural, y su atadura a la cresta del pubis.
7. Anillo crural formado por dicho doblez.
8. Vasos epigástricos.
9. Músculo recto, cortado cerca del pubis.
10. Aponeurosis de los músculos del abdomen.
11. Vaso deferente.
12. Vasos espermáticos rodeados del tejido celular.
13. Grande vena iliaca secundaria.
14. Grande arteria iliaca secundaria.
15. Arco crural en su principio.
16. Corte de los músculos del abdomen.
17. Músculo iliaco.
18. Cresta de íleon.
19. Corte de la arteria aorta ventral.
20. Corte de las vértebras lumbares y sacras.
21. Remate del conducto vertebral y cola de caballo.
22. Apófisis espinosas.
23. Corte de la arteria iliaca primitiva izquierda.
24. Corte de la vena iliaca primitiva izquierda.
25. Arteria iliaca secundaria interna o hipogástrica.
26. Ligamento sacro-esciático.
27. Corte del coxis.
28. Vasos pudendos.
29. Gordura y vasos que se manifiestan en ella.
30. Corte del cutis por medio del perineo entre las nalgas y parte posterior del sacro, hasta la cuarta vértebra lumbar".

xos y en el estado natural, el tendón del músculo psoas e iliaco, los grandes vasos crurales y, también, los vasos linfáticos que vienen de toda la extremidad; pero en el estado patológico pasa también a veces algunas de las partes contenidas en el vientre y forma un tumor en el fondo de la ingle, que es lo que se llama hernia crural.

"Este arco así formado ofrece a la consideración ciertas disposiciones particulares, poco o nada sabidas, y que son de absoluta necesidad para el perfecto conocimiento de esta hernia y modo de operar en ella sin peligro. Después que el pilar inferior se separa del superior para formar el anillo inguinario, va a fijarse en un tubérculo del pubis, que he llamado espina, la cual da principio a la cresta del ramo superior de este hueso, y es la continuación de la línea ileopectínea; pero este pilar no sólo se ata a la espina por un conjunto considerable de fibras aponeuróticas, sino que, siendo aquí mucho mayor el doblez del arco, se continúa hacia dentro, atándose a la cresta del pubis, mediante un notable pliegue que se forma de la porción de aponeurosis que le corresponde. La particular disposición de este pliegue o doblez, dirigido de abajo arriba, y su atadura, que se extiende desde la expresada espina hasta el remate de la cresta, que es mayor de una pulgada en algunos sujetos, es tan admirable que merece para nosotros toda consideración, pues sin él todos padeceríamos tal vez una eventración excesiva y sumamente peligrosa. De ella resulta que el arco crural tiene dos bordes: uno externo algo redondo, a modo de cordón, más grueso hacia el pubis y parecido a un ligamento, y por eso le llamó así Falopio; a él se adhiere la expansión del fascialata, como se ha dicho, y en los sujetos muy flacos se manifiesta la dirección y tensión de este cordón a través de los tegumentos: el otro borde, que ya he llamado interno, es el remate del doblez de la aponeurosis: es muy delgado; y desde su principio se une luego íntimamente con la aponeurosis iliaca que cubre el músculo de este nombre. Esta estrecha unión y la del fascialata con el borde externo son más notables desde la espina anterior superior del íleon hasta cerca de los vasos crurales, de que resulta que en todo este transcurso está el arco crural más aplanado y muy deprimido sobre el músculo iliaco, sirviéndole como de faja para sujetarle y retenerle en su lugar durante sus contracciones; por consiguiente, es imposible que en todo este espacio pueda jamás formarse la hernia crural, como lo han pensado algunos".

El Vallesiense

La fauna de mamíferos del yacimiento paleontológico de Can Llobateres, en las proximidades de Barcelona, refleja un momento culminante de la riqueza y diversidad animal del continente europeo, hace 12 millones de años

Jordi Agustí

Desde que Georges Cuvier describiera los restos de vertebrados fósiles de los arrabales parisienses de Montmartre, en el siglo pasado, el conocimiento sobre las faunas de mamíferos terciarios de Europa no ha cesado de aumentar. Ese grupo constituye uno de los conjuntos fósiles mejor conocidos del mundo. Se trata de una historia que hilvana una larga sucesión de extinciones y repoblamientos y que nos permite reconstruir la evolución climática y paleogeográfica de nuestro continente en los últimos 60 millones de años.

De entre los cinco períodos en que se divide el Terciario (Paleoceno, Eoceno, Oligoceno, Mioceno y Plioceno), tal vez sea el Mioceno —hace entre 25 y cinco millones de años— el mejor estudiado; a él se le atribuye también una mayor incidencia en la evolución posterior del planeta. En efecto, durante el Mioceno se originan los primeros homínidos; así mismo, el final de ese período contempla la desecación casi absoluta del Mediterráneo, prefigurando lo que será su estructura actual; digamos, por último, que en su transcurso tienen lugar los primeros fenómenos de glaciarismo antártico, preludio de los fríos del Pleistoceno.

En lo que concierne al Mioceno europeo, su evolución ha podido seguirse a través de distintos yacimientos y cuencas sedimentarias; merecen citarse, entre otras, la cuenca de Aquitania, el Valle del Ródano y la del Vallés-Penedés. Esta última, a pocos kilómetros de Barcelona, ha dado nombre a un momento decisivo del Terciario europeo: el Vallesiense.

La cuenca del Vallés-Penedés constituye una estrecha fosa tectónica situada al nordeste de la península Ibérica, que se extiende paralelamente a la costa catalana, limitada por las cordilleras Litoral y Prelitoral (los Catalánides). Su origen se remonta más de 30 millones de años atrás, cuando, desde el norte europeo, comienza a formarse una dorsal (*rift*) similar a la existente actualmente en Africa oriental. Este proceso de fracturacioón de la corteza (*rifting*), sin embargo, no llegó a progresar como sí lo hicieron, en cambio, la dorsal centro-atlántica y la del mar Rojo (responsable esta última de la separación de Arabia de Africa.) No obstante, ese abortado proceso de formación de una dorsal tuvo importantes consecuencias para la configuración definitiva de Europa occidental (por ejemplo, la formación del valle del Ródano o la separación de Córcega y Cerdeña del continente).

El Vallés-Penedés constituye la prolongación hacia el sur de esa incipiente dorsal o *rift*. La cuenca forma parte de un sistema de fosas tectónicas de dirección suroeste-nordeste, que se extiende en paralelo a la cuenca mediterránea occidental y cuyos márgenes más elevados —y, por tanto, emergidos— son los Catalánides, por un lado, y las islas Baleares, por otro. Durante la mayor parte de su historia —desde los comienzos del Mioceno hasta la actualidad— la sedimentación de la fosa fue de carácter continental. En numerosos puntos de la cuenca, este drenaje permitió el establecimiento de áreas palustres, favorables a la conservación de restos de vertebrados procedentes de las especies que medraban en esa zona.

Los primeros hallazgos de mamíferos fósiles en el Vallés-Penedés se produjeron a comienzos de nuestro siglo; fue mérito del canónigo Jaime Almera. Aunque el sucesor de Almera en el museo diocesano de paleontología, J. R. Bataller, continuó interesándose por los cada vez más abundantes restos de mamíferos fósiles que aparecían en diversos lugares de la cuenca, no se abordó el trabajo sistemático de prospección de la misma hasta los años cuarenta. En el reconocimiento por parte de la comunidad internacional del valor encerrado en la cuenca intervino de una manera destacada el esfuerzo de dos jóvenes paleontólogos: Miquel Crusafont y Josep F. de Villalta, al que más tarde se le unió un tercero, Jaume Truyols. Tomando como cuartel general el entoces vetusto Museo de Historia de Sabadell, los tres realizaron, a lo largo de más de 20 años, una de las tareas de recolección y estudio de mamíferos terciarios más importantes de Europa. Ese trabajo científico instó la creación, en 1969, del Instituto de Paleontología de Sabadell.

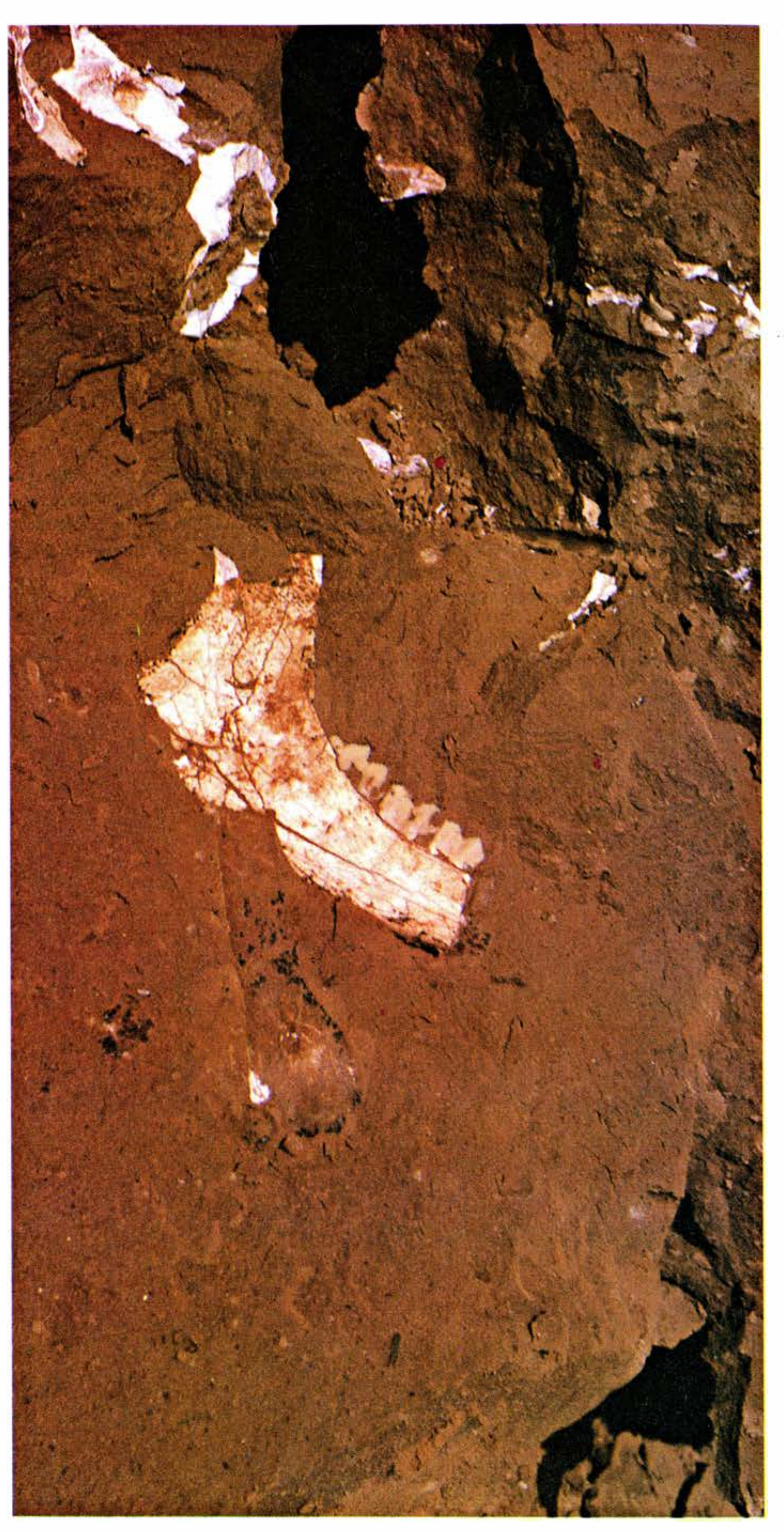
Buena parte de los yacimientos de vertebrados del Vallés-Penedés se sitúan entre el Mioceno medio (hace unos 16 millones de años) y el Mioceno superior (hace unos 12 millones de años). En la época en que Crusafont, Villalta y Truyols empezaron sus trabajos en esta cuenca, los yacimientos europeos de esa edad no eran muy abundantes. Del Mioceno medio se conocían dos localidades francesas, Sansan (cerca de Agen) y La Grive (en la región de Lyon), que habían proporcionado copiosos restos de mamíferos. La fauna, muy variada, comprendía diversos órdenes. Había, entre ellos, formas de gran talla, como rinocerontes de los géneros *Aceratherium* (*A. tetradactylum*) y *Dicerorhinus* (*D. sansaniensis*) y proboscídeos de los géneros *Tetralophodon* y *Deinotherium*. El concepto que hoy tenemos de rinoceronte tal vez fuera sólo aplicable a la segunda de las especies citadas, *Dicerorhinus sansaniensis*, ya que *Aceratherium* carecía de apéndices córneos y llevaba, probablemente, un modo de vida acuático. Como dato sobresaliente, este taxón presentaba un manifiesto dimorfismo sexual en relación con el tamaño de los incisivos, mucho más desarrollados en los machos que en las hembras.

Tetralophodon pertenecía al grupo de los "mastodontes", precursores de los actuales elefantes. Se distinguían de estos últimos, entre otros rasgos, por

sus molares, muy primitivos y formados por grandes tubérculos, semejantes hasta cierto punto a los nuestros o a los de los suidos (cerdos y jabalíes); la denominación "mastodón", que les impuso Cuvier, procede precisamente de ese carácter: "diente-pezón". En los elefantes estos tubérculos han desaparecido, sustituidos por láminas estrechas que les permiten triturar el alimento. Los mastodontes presentan una curiosa historia biogeográfica, que recuerda la de los Póngidos. Originarios de Africa, debieron surgir de algún grupo de ungulados primitivos; en el Oligoceno se encuentran representados por los géneros *Phiomia* y *Palaemastodon*. Durante el Mioceno inferior, la placa africana colisionó con Eurasia a través de la región arábiga: ello posibilitó la expansión de los mastodontes por el Viejo Mundo y América del Norte. En Europa, las formas más primitivas, correspondientes al género *Gomphotherium*, son reemplazadas, durante el Mioceno medio y superior, por *Tertralophodon*, que poseía una mayor talla y unos molares más complicados. A diferencia de los elefantes actuales, *Tetralophodon* tenía el cráneo muy largo, coronado en su extremo anterior por cuatro colmillos rectilíneos, dos en el maxilar superior y dos, más reducidos, en la mandíbula. Medía unos dos metros y medio hasta la cruz.

El otro grupo de proboscídeos presente en las faunas del Mioceno europeo, *Deinotherium*, no tenía nada que ver con los anteriores, distanciamiento que arranca del propio origen de los proboscídeos. Su dentición era muy diferente, con molares constituidos por dos crestas transversales cortantes y dos únicos incisivos implantados en la mandíbula y recurvados hacia abajo y hacia atrás, en una extraña posición. Se ha especulado mucho sobre el significado adaptativo de esas peculiares defensas, casi siempre interpretadas en términos de una posible función roturadora del suelo a la búsqueda de raíces y bulbos. Sea como fuere, lo cierto es que los ecosistemas continentales del Mioceno europeo podían soportar la presencia de hasta dos especies diferentes de proboscídeos compartiendo el mismo hábitat.

Por otro lado, los ciervos estaban representados por una forma de pequeñas dimensiones y sin astas, *Micromeryx*, y dos formas con astas, *Heteroprox* y *Stephanocemas*. Estos últimos presentaban una talla mediana, menor que la de los ciervos actuales. Se distinguían de sus parientes actuales en



1. MANDIBULA de *Tragoportax gaudryi* aflorando en los limos del yacimiento de Piera, en el Penedés. *Tragoportax* es el bóvido dominante en el Vallesiense superior y caracterizará las asociaciones de mamíferos del resto del Mioceno. Sabido es que los bóvidos son elementos escasamente representados en los yacimientos miocénicos. Su entrada en Europa occidental junto a otros elementos marca el final de la variada fauna del Mioceno inferior y medio que todavía encontramos en la localidad vallesana de Can Llobateres.

que sus astas carecían de candiles. Así, en el caso de *Heteroprox*, el asta culminaba en una expansión circular repleta de pequeñas protuberancias; en *Stephanocemas*, el asta se bifurcaba en Y griega. Había también ciervos de agua (*Dorcatherium*), similares a los que actualmente se hallan en las pluvisilvas del Extremo Oriente (*Tragulus*, *Hyemoschus*).

Existía también una amplia diversidad de suidos, representados por varios géneros: *Listriodon*, *Conohyus*, *Hyotherium*, *Taucanamo* y otros más. *Listriodon* tenía el tamaño de un jabalí robusto y se caracterizaba por poseer grandes colmillos recurvados hacia arriba. Sus molares, formados por láminas transversales cortantes, estaban adaptados al consumo de vegetales duros (tal vez raíces y gramíneas). Por contra, los molares de los restantes suidos recordaban los de nuestro jabalí, propios de un régimen omnívoro.

Los bóvidos estaban representados por formas primitivas (*Eotragus*, *Protragocerus*), emparentadas con el nilgo, actual poblador de las praderas del subcontinente índico.

Entre los carnívoros, destacaba la presencia de grandes cánidos del género *Amphicyon* y de felinos "dientes de sable", como *Sansanosmilus*.

Por último, entre los pequeños mamíferos abundaban los cricétidos (grupo que incluye los actuales hámsters) y los glíridos (donde se encuadran los lirones).

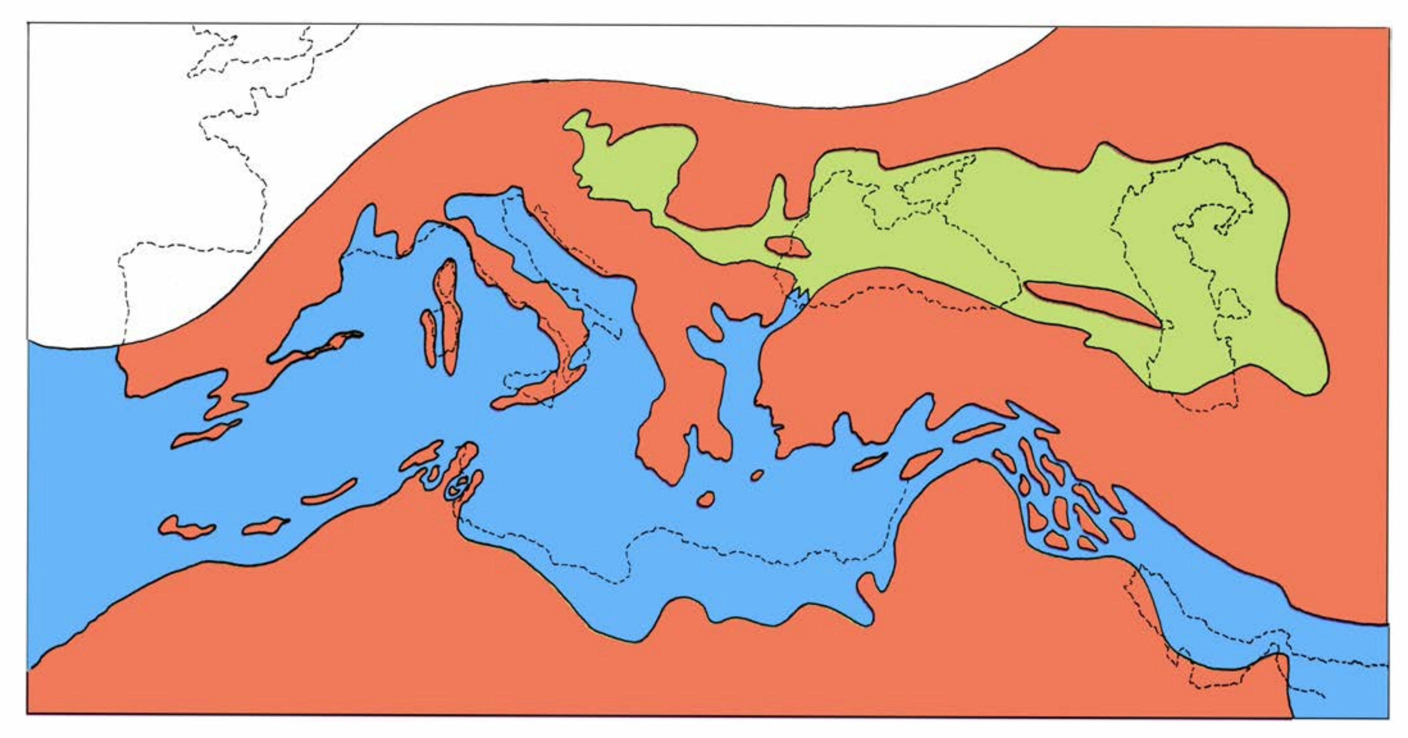
Asociaciones formadas por esos grupos de mamíferos –pertenecientes al Mioceno medio– se descubrieron en diversas localidades del Vallés-Penedés, especialmente en la trinchera del ferrocarril cerca de Sant Quirze y en el yacimiento de Can Mata, en el Penedés.

Vayamos al Mioceno superior. Por lo que a esta edad se refiere, no abundaban los yacimientos bien conocidos: tan sólo Pikermi, en Grecia, excavado por paleontólogos del British Museum (Natural History), y Concud, en la cuenca de Calatayud-Teruel. Las faunas de Pikermi y Concud eran muy diferentes de las descritas en el Mioceno medio. Para empezar, el elemento dominante era un équido tridáctilo del tamaño de un poney, conocido con el nombre de *Hipparion*, ausente en los niveles anteriores. *Hipparion* procedía de Norteamérica y, a pesar de su tridactilia (los caballos actuales son monodáctilos, es decir, con un solo dedo por extremidad), se trataba de un forma corredora adaptada a los espacios abiertos. Sus dientes recordaban ya a los caballos actuales, con una corona alta, fuertemente replegada, cuyos huecos estaban ocupados por abundante cemento que les proporcionaba solidez. Esta dentición se hallaba en consonancia con el tipo de vegetación (gramíneas) que cubría las estepas del Mioceno superior. Los antecesores de *Hipparion*, por el contrario, adaptados a un régimen de vegetales blandos, presentaban molares muy diferentes, con corona baja y sin cemento.

Junto a *Hipparion* había ya verdaderos jiráfidos, formas de origen asiático ausentes en las faunas de Sansan o La Grive. Entre los roedores, predominaban los Múridos, familia a la que pertenecen las actuales ratas y ratones. El resto de los grupos estaba representados por formas más evolucionadas que las del Mioceno medio, aunque con ausencias significativas. De unas faunas compuestas básicamente por cérvidos, suidos, rinocerontes y proboscídeos se había pasado a otras dominadas por bóvidos, jiráfidos e *Hipparion*. En general, pues, las faunas del Mioceno superior tenían un carácter mucho más abierto y seco. Piera, en el Vallés-Penedés, presentaba una asociación parecida a la descubierta en Pikermi o en Concud.

Sin embargo, aunque *Hipparion* constituía un género muy frecuente en otras localidades del Vallés-Penedés, el resto de la fauna que solía acompañarle en esos yacimientos no tenía nada que ver con las asociaciones típicas del Mioceno superior, sino que continuaban siendo elementos característicos del Mioceno medio: *Listriodon*, *Dorcatherium*, *Micromeryx*, *Amphicyon*, etcétera. Esa paradoja intrigó profundamente a Crusafont, quien, junto con sus colaboradores, puso todo su em-

2. DISTRIBUCION DEL SISTEMA DE FOSAS TECTONICAS de dirección Norte–Sur en Europa occidental. El mecanismo que originó este conjunto de fosas es similar al que en otras zonas del globo ha dado lugar a las dorsales oceánicas (por ejemplo, el mar Rojo). En este caso, sin embargo, el proceso no llegó a prosperar. La fosa del Vallés–Penedés (*flecha*) constituye una prolongación de este sistema hacia el Sur.



3. DISTRIBUCION APROXIMADA DE TIERRAS en el Mediterráneo durante el Vallesiense. Buena parte del territorio de Europa central se encontraba entonces ocupado por un mar interior denominado Parathetys (*mancha amarilla verdosa*). La paulatina desecación de este mar interior debió abrir vías de comunicación continentales que permitieron así la entrada de fauna oriental durante el Vallesiense superior (Adaptado de un esquema de Rögl y Steiningen.)

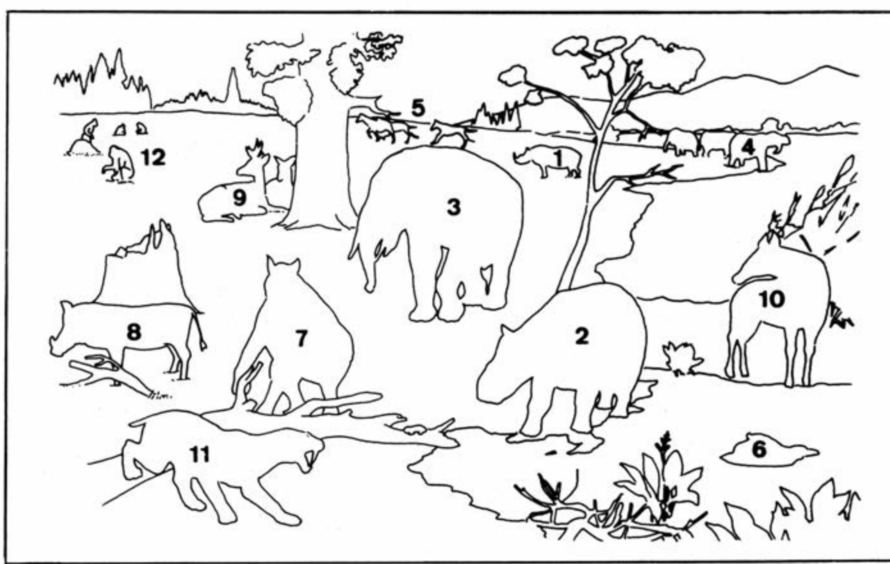
peño en el análisis de este tipo de faunas. No tardó en advertir que el carácter anómalo de los yacimientos con *Hipparion* del Vallés-Penedés no era atribuible a factores de índole geográfica o regional, sino que se trataba de una fase particular dentro del Mioceno: constituía un episodio inédito en el resto de Europa, que había pasado inadvertido a la hora de elaborar la historia geológica del continente. Crusafont propuso el término de "Vallesiense" para designar ese nuevo piso de mamíferos, situando el estrato-tipo del mismo en la localidad de Can Ponsic, cerca de la ciudad de Tarrasa. Muy pronto, sin embargo, la riqueza de hallazgos en otra localidad próxima a Sabadell, Can Llobateres, movió a Crusafont a proponer este último yacimiento como nuevo y definitivo estrato-tipo.

El yacimiento de Can Llobateres se encuentra a pocos kilómetros del núcleo urbano de Sabadell, en el margen izquierdo de la carretera que une esta ciudad con la vecina población de Mollet. Fue descubierto a principio de la década de los 30 por R. Arquer y el propio Crusafont al realizarse los trabajos de apertura de esa vía. A lo largo de más de 40 años se han sucedido diversas fases de prospección y excavación, dando como resultado una lista de Vertebrados de más de medio centenar de especies, lo que convierte a esta localidad en una de las más ricas de Europa.

La asociación faunística de Can Llobateres muestra esa curiosa mezcla de elementos típicos del Mioceno medio, junto a los nuevos invasores "asiáticos" del Vallesiense. Así, el elemento más común es el équido *Hipparion* (especie *H. catalaunicum*), que, procedente de Norteamérica, se extendió rápidamente por toda Eurasia hace unos 12 millones de años. El resto de la fauna de perisodáctilos muestra ese mismo carácter mixto. Entre los rinocerontes, persisten las especies *Aceratherium incisivum* y *Dicerorhinus sansaniensis*, acompañados por un nuevo elemento de gran talla, *Dicerorhinus schleiermarcheri*. Junto a ellos se encontraban también perisodáctilos de talla más reducida, como son los tapires (*Tapirus priscus*) y los chalicotéridos (*Chalicotherium grande*). Estos últimos constituyen un grupo verdaderamente peculiar. En efecto, los miembros anteriores de *Chalicotherium* eran más largos que los posteriores y, en lugar de pezuñas, estaban dotados de garras. Estos parientes del caballo eran, probablemente, ramoneadores de árboles y arbustos, cuyas hojas y frutos debían alcanzar con sus extremidades anteriores, sentándose sobre sus cuartos traseros, tal como hacen hoy en día los gorilas.

La fauna de los artidáctilos, muy abundante, está dominada por los suidos, representados por tres géneros diferentes: *Listriodon, Parachleuastochoerus* e *Hyotherium*. Abundan los ciervos de agua, en tanto que los verdaderos cérvidos están representados por *Micromeryx* y *Euprox* (ciervo de talla mediana cuyas astas poseían un único candil). Los bóvidos están relacionados con los actuales nilgos. Junto a todos estos elementos, la mayoría de los cuales proceden de las faunas del Mioceno medio, encontramos auténticos jiráfidos del género *Palaeotragus*, probablemente de origen oriental.

La fauna de carnívoros asociada a este conjunto de formas muestra, asimismo, un carácter mixto, con especies autóctonas del Mioceno medio junto a inmigrantes orientales que caracterizarán al Mioceno superior. Tal es el caso, por ejemplo, entre los felinos, del "dientes de sable", *Machairodus*, que desplaza a *Sansanosmilus*, o del cánido gigante *Amphicyon*, que coexiste con los primeros osos verdaderos (*Ursavus*, *Indarctos*, *Protursus*). Existe, además, una gran variedad de mustélidos, del tipo de los glotones (*Plesiogulo*), tejones (*Palaeomeles*, *Plesiomeles*, etcétera), mofetas (*Trocharion*, *Promephitis*, etcétera), nutrias (*Paralutra*) y otros. En cuanto a los hiénidos, están todavía representados por formas primitivas que conservan caracteres viverroides (*Miohyaena*). El resto de la fauna presenta los mismos ele-



4. RECONSTRUCCION DE LA FAUNA del Vallesiense, hace unos 12 millones de años. Había formas de mamíferos de gran tamaño, como los rinocerontes *Dicerorhinus* (*1*) y *Aceratherium* (*2*), este último sin apéndices nasales. Abundaban los proboscídeos de los géneros *Tetralophodon* (*3*), con cuatro defensas, y *Deinotherium* (*4*), con dos defensas recurvadas hacia atrás. Entre los perisodáctilos destacaba un équido tridáctilo, *Hipparion* (*5*); junto a él se ha detectado la presencia de tapires (*6*) y de otro perisodáctilo *Chalicotherium* (*7*). Estos últimos presentaban los cuartos traseros más cortos que los delanteros y sus extremidades se hallaban coronadas por garras. Un género de suidos era *Listriodon* (*8*); de ciervos, *Euprox* (*9*); de jiráfidos, *Palaeotragus* (*10*); de felinos dientes de sable, *Machairodus* (*11*), y de driopitécidos, *Hispanopithecus* (*12*).



mentos mencionados ya para el Mioceno medio, destacando entre los roedores la alta diversidad que alcanzan cricétidos (seis especies) y glíridos (cinco especies).

Por lo que se refiere al tipo de vegetación que debió predominar durante el Vallesiense, ésta se corresponde bastante bien con la denominada *laurisilva*, que encontramos hoy en las zonas templadas del Extremo Oriente. Se caracterizaba por presentar un carácter mixto, con formas todavía de tipo subtropical (con *Cinnamomum*, *Ficus*, etcétera), acompañadas por árboles de hoja caduca (arces, hayas, encinas, olmos, sauces, chopos, etcétera). Floras de este tipo se han hallado en los sedimentos vallesienses de diversas cuencas de Cataluña: Cerdaña, Seo de Urgel y La Bisbal. En general, el clima reinante debió ser relativamente cálido, con temperaturas medias anuales entre 16 y 20 grados. Inviernos secos y suaves se alternarían con veranos cálidos y muy húmedos, no existiendo todavía la sequía estival, característica del clima mediterráneo actual.

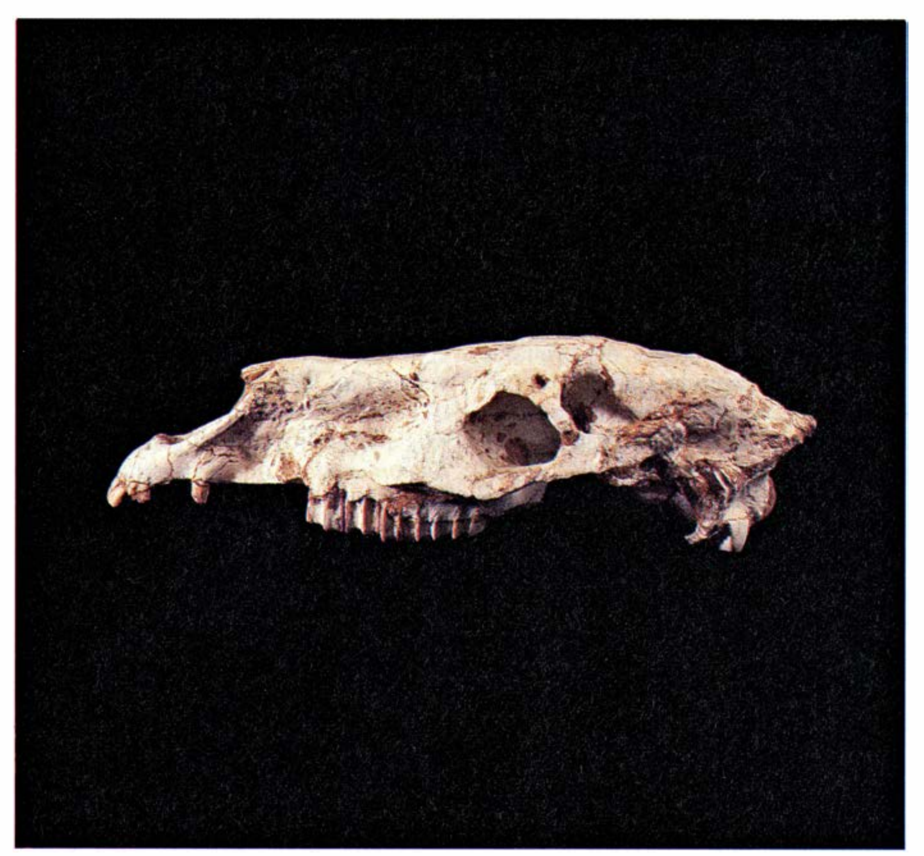
Dentro del conjunto de Can Llobateres, la representación de primates constituye un capítulo aparte. Los primates ofrecen una curiosa historia evolutiva en el Terciario de Europa. Los primeros representantes de este orden en la península Ibérica pertenecen a las familias Adapidae y Tarsidae (géneros *Necrolemur*, *Adapis* y *Pseudoloris*), del grupo de los Prosimios. Se encuentran en numerosos yacimientos del Eoceno prepirenaico (hace unos 45 millones de años).

El gran corte faunístico, conocido por la "grande Coupure", que supone el tránsito del Oligoceno conllevará la desaparición de los primates de Europa, hace unos 35 millones de años. Su evolución continuará en Africa, donde se originarán los primeros póngidos (*Aegyptopithecus*, del Oligoceno de El Fayoum, en Egipto). La colisión de la placa africana con Eurasia en el Mioceno inferior dará lugar a la entrada de los primeros antropoides en Europa, los cuales persistirán hasta el Mioceno superior. Los primeros representantes de este grupo en Europa pertenecen al género *Pliopithecus*, que algunos autores relacionan con los actuales gibones. En el Vallés-Penedés, estos póngidos presentan una curiosa distribución temporal. Así, se encuentran en los niveles pre-vallesienses de Castell de Barberá y Can Feliu, cerca de Sabadell. Faltan, por el contrario, en los niveles con dryopitécidos del Vallesiense y reaparecen en el Vallesiense terminal de los alrededores de Tarrasa, cuando han desaparecido ya los anteriores. Parece existir, pues, cierta exclusión ecológica entre los pliopitecinos y los dryopitecinos. Se trata de una competencia, hasta cierto punto, lógica, si se tiene en cuenta que *Pliopithecus* era de menor talla que la mayoría de los dryopitecinos y poseía un esqueleto postcraneal mucho más grácil. Debió tener, pues, hábitos más decididamente arborícolas que los mostrados por sus predecesores.

De todos modos, según se ha apuntado ya, los miembros de la subfamilia Dryopithecinae constituyen el grupo más representativo de hominoideos durante el Vallesiense. La primera cita en la península Ibérica data de 1914 y corresponde al hallazgo, en la cuenca pirenaica de la Seo de Urgel, de una mandíbula casi entera de *Dryopithecus fontani*. El descubrimiento lo hizo Smith Woodward si bien la identificación de esa especie de talla mediana fue obra de Lartet, en el siglo pasado. Posteriormente, Villalta y Crusafont anunciaron el descubrimiento en los barrancos de Can Vila, cerca de Hostalets, en el Penedés, de una serie dentaria inferior que atribuyeron al género asiático *Sivapithecus*. Con el tiempo, fueron apareciendo nuevos hallazgos en otros puntos de la cuenca: Viladecavalls, Can Ponsic y, sobre todo, Can Llobateres. Gracias a esos nuevos descubrimientos, Villalta y Crusafont comprobaron que el hominoideo del Vallés-Penedés no guardaba una estrecha relación con *Sivapithecus*, como habían supuesto en un comienzo, sino que se trataba de un nuevo driopitecino autóctono, para el que propusieron el nombre de *Hispanopithecus laietanus*. *Hispanopithecus* era una forma de dimensiones parecidas a las de un chimpancé de talla grande, algo menor que *Dryopithecus fontani*, y cuyas afinidades exactas han sido objeto de mucho debate. Debido a un error en el montaje del ejemplar-tipo de la especie, G. H. R.von Kaenigswald, de la Universidad de Utrecht, creyó ver en él cierta relación con el *Symphalangus* actual. Por su parte David Pilbeam y E. L. Simons, de la Universidad de Yale, lo han considerado una especie de *Dryopithecus*. Emiliano Aguirre, actual director del Museo Nacional de Ciencias Naturales de Madrid, sostiene que presenta afinidades con otros primates de origen africano.

Sean cuales fueren las relaciones filogenéticas exactas de *Hispanopithecus*, lo cierto es que, junto a él, han aparecido en Can Llobateres otro conjunto de piezas dentarias cuyas dimensiones son todavía más reducidas. Para esta segunda especie, Crusafont y J. Hürzeler, de la Universidad de Basilea, propusieron, en la década de los 60, el nombre de *Rahonapithecus sabadellensis*. Como en el caso de *Ramapithecus* con respecto a *Sivapithecus*, *Rahonapithecus* bien pudiera ser la hembra de *Hispanopithecus*.

Por último, parece segura la coexistencia de un auténtico *Dryopithecus* al lado de *Hispanopithecus* en Can Llobateres. En 1969, Crusafont y Hürzeler



5. CRANEO DE *HIPPARION MEDITERRANEUM* del Mioceno superior de Piera. Originario de Norteamérica, se expandió rápidamente por toda Eurasia hace unos millones de años. *Hipparion* fue un équido corredor que conservaba todavía dos dedos laterales en cada una de sus extremidades. Sus molares, de corona muy alta y con cemento, testimonian una dieta de gramíneas propia de un paisaje vegetal de pradera abierta.



6. CRANEO DE *ACERATHERIUM INCISIVUM* encontrado en los alrededores de Sabadell. Este rinoceronte fósil carecía de los apéndices córneos que normalmente caracterizan a los rinocerótidos. Su modo de vida debió ser, en realidad, mucho más parecido al de los actuales hipopótamos. Machos y hembras mostraban un notable dimorfismo sexual, al presentar los primeros unos incisivos mucho más desarrollados.

propusieron una nueva especie de este género, *Dryopithecus piveteaui*, para un tercer molar inferior encontrado en la mencionada localidad. Sin embargo, es posible que esta pieza corresponda en realidad a *Hispanopithecus*. Más tarde apareció un canino con el esmalte crenulado que corrobora la existencia de un segundo póngido de talla grande en Can Llobateres. Caninos de este tipo se encuentran en formas africanas de gran talla como *Proconsul major*, citado a veces como posible antecesor del gorila.

Con sus 80 especies de mamíferos, más o menos, Can Llobateres constituye un momento de clímax del Terciario europeo. Nunca más volverá a disfrutar Europa del nivel de diversidad faunística allí alcanzado. Curiosamente, las localidades del Vallesiense superior situadas por encima mismo de Can Llobateres (Viladecavalls, por ejemplo) muestran un panorama enteramente distinto. La fauna vallesiense ha entrado en crisis. Así, entre los roedores, desaparecen la mayor parte de cricétidos y glíridos (estos últimos quedan reducidos a su representación actual). Por contra, unos nuevos inmigrantes asiáticos, los múridos (la familia de ratas y ratones), se hacen mayoritarios. No tardarán en diversificarse y, durante más de cinco millones de años, constituirán el grupo de micromamíferos dominante.

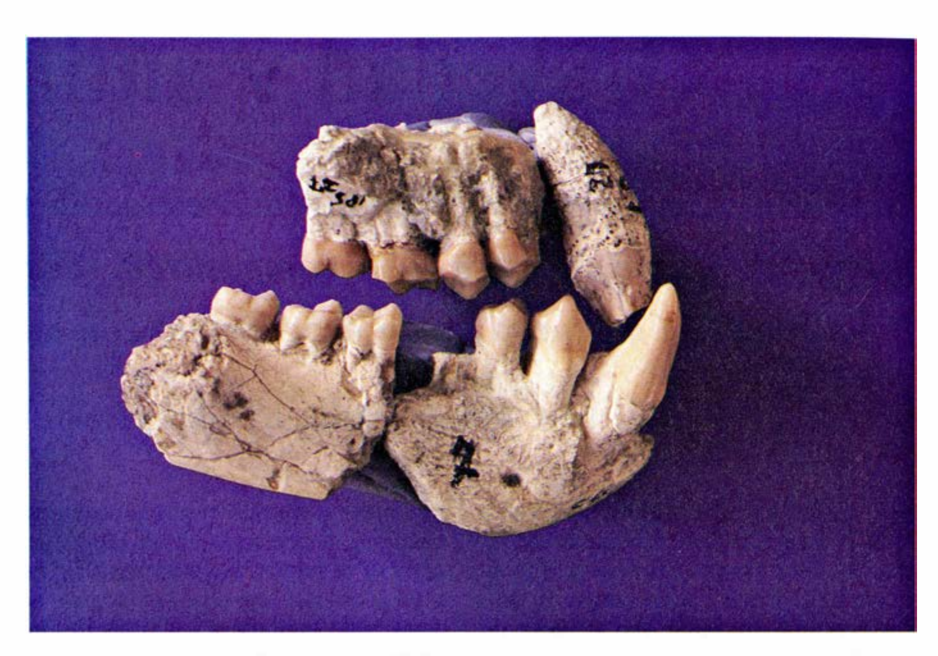
Entre los artiodáctilos, el cambio afectó especialmente a los suidos y similares, con la desaparición de diversos géneros (así, *Listriodon*, *Parachleuastochoerus* e *Hyotherium*), que son substituidos por formas orientales (*Schizochoerus*, una forma convergente con *Listriodon* también encontrada en Turquía, y *Microstonyx*, una suerte de jabalí gigantesco). Los géneros de bóvidos y cérvidos característicos del Mioceno medio que persistían todavía durante el Vallesiense ceden el paso a elementos orientales. En el caso de los perisodáctilos, y de las cuatro líneas evolutivas de rinocerontes presentes en Can Llobateres, sólo persistirán dos en los niveles posteriores. En lo concerniente a los carnívoros, desaparecen definitivamente los cánidos gigantes (*Amphicyon*) y los hiénidos primitivos, sustituidos por verdaderos úrsidos (*Indarctos*) y por las primeras hienas de aspecto moderno (*Adcrocuta*), respectivamente. Otros grupos, sin embargo, como los insectívoros y lagomorfos, resultaron escasa o nulamente afectados por la crisis vallesiense.

¿Cuál pudo ser el origen de esa cri-

sis? ¿Qué fue lo que pudo causar el derrumbamiento de uno de los conjuntos más ricos del Terciario europeo, provocando el final de la fauna que había caracterizado hasta entonces el Mioceno? La correlación de la crisis de extinción vallesiense con cualquiera de los acontecimientos paleoclimáticos o paleogeográficos que tuvieron lugar durante el Mioceno superior presenta algunos problemas. Hay, sin embargo, indicios de que en ella debieron intervenir factores de tipo climático, que afectarían, sobre todo, a los biotopos húmedos y sus representantes más característicos (los glíridos entre los micromamíferos y los suidos entre los macromamíferos). Añádase, además, que el episodio vallesiense muestra un claro carácter latitudinal (algunas de las especies extintas de la península Ibérica persisten en zonas más septentrionales de Europa).

Así, pues, durante el Vallesiense superior tiene lugar la transición hacia un biotopo mucho más árido que el que encontramos en Can Llobateres. Sin embargo, a diferencia de otras fases de desecación general del ambiente, en este caso el cambio no va ligado a un descenso de temperatura, sino a una elevación de la misma. En efecto, al principio del Vallesiense superior se detecta un incremento térmico de las aguas oceánicas. Por otro lado, la crisis vallesiense, con su cortejo de inmigrantes orientales, parece íntimamente ligada a la evolución paleogeográfica de Europa durante el Mioceno superior. Durante buena parte de ese período, Europa central estuvo ocupada por un mar interior, el Parathetys, que estaba unido al Mediterráneo. Una primera separación entre ambos se produce en el Mioceno medio, hace unos 15 millones de años. Sin embargo, las aguas del Mediterráneo volvieron a entrar en el Parathetys poco después. Una segunda desconexión, esta vez definitiva, se produjo en el Vallesiense superior. A consecuencia de ello, el Parathetys se vio abocado a una rápida reducción por evaporación, que acabó por desecarlo en buena parte (los actuales mar Negro y mar Caspio constituyen el último reducto del Parathetys). Ese proceso de retracción de las aguas permitió la apertura de nuevas vías de comunicación con Asia, al tiempo que un biotopo de carácter mucho más estepario se extendía por la mayor parte de Europa.

De este modo, como tantas otras, la crisis vallesiense vino condicionada por la conjugación de diversos factores combinados, tanto de naturaleza climática (aridificación del ambiente) como de índole paleogeográfica (cierre del Parathetys). A partir de entonces, otras crisis sucesivas marcarán un progresivo deterioro de la fauna de mamíferos de Europa (desecación del Mediterráneo hace unos seis millones de años, alternancia de fases frías desde hace tres millones de años, y otras). De esta manera, la altísima diversidad faunística alcanzada en Can Llobateres ya no volvería a repetirse nunca en la historia geológica del viejo continente.



7. FRAGMENTO DE MAXILAR Y MANDIBULA de *Hispanopithecus* procedente del Vallesiense de Can Llobateres. *Hispanopithecus* era una forma estrechamente emparentada con el género euroasiático *Dryopithecus* cuyos restos dentarios han aparecido en diversas localidades de la cuenca del Vallés—Penedés. Los póngidos entran en Eurasia durante el Mioceno inferior, procedentes de Africa y se mantienen hasta el Vallesiense superior, momento en que, junto con otras muchas especies, desaparecen del registro fósil de Europa. A partir de ese momento, la evolución posterior de los homínidos quedará restringida a Africa.



8. CRANEO DE *MICROSTONYX* procedente de los alrededores de Tarrasa, en el Vallés occidental. Este género de suidos gigantes constituye uno de los inmigrantes orientales que durante el Vallesiense superior substituyeron a la variada gama de formas de talla mediana que hasta entonces habían caracterizado el Mioceno, como *Listridon*, *Hyotherium* y otros. Su entrada coincide con una aridificación fluvial del ambiente.

Gravedad y antimateria

Newton y Einstein mantuvieron que la aceleración gravitatoria de un objeto era independiente de su masa y su composición. Esa idea, hoy cuestionada, se halla sometida a prueba en un experimento con antimateria: con antiprotones

Terry Goldman, Richard J. Hughes y Michael Martin Nieto

Nadie ha dejado caer nunca una sola partícula de antimateria. Lo que no obsta para que la mayoría de los físicos admitan que caería exactamente igual que si fuera de materia. Se basan en dos ideas sólidamente establecidas: el principio de equivalencia de la gravitación y la simetría mecánico-cuántica entre materia y antimateria. Pero se trata de una argumentación que se tambalea ante la posibilidad de que el principio de equivalencia no sea cierto. Verdad es que todos los esfuerzos teóricos por reunir la gravedad con las demás fuerzas de la naturaleza en una teoría cuántica unificada y coherente predicen la existencia de nuevas fuerzas de intensidad gravitatoria que, entre otras cosas, violarían dicho principio.

¿Se ha observado ya esos efectos en experimentos recientes? Verosímilmente. Nos referimos a efectos de escaso alcance en el caso de experimentos ordinarios con materia en el campo gravitatorio de la Tierra. Ahora bien, en lo que atañe a la antimateria, esas nuevas fuerzas podrían producir grandes anomalías. Por esa razón, la medición experimental de la aceleración gravitatoria de la antimateria constituiría un hito en el desentrañamiento de la gravedad cuántica. Los autores pertenecemos a un grupo internacional que se ha constituido con el propósito de realizar tal experimento.

Si se demuestra la violación del principio de equivalencia, se abrirá un capítulo importante en la historia de la física, pues en ese principio descansan la teoría newtoniana de la gravitación y la de Einstein. El principio establece que dos objetos caen con la misma aceleración gravitatoria, con independencia de su masa y de su composición material. Fue Galileo quien expuso de esta forma la idea que comentamos, basando sus conclusiones en experimentos con planos inclinados y en conjeturas matemáticas acerca del movimiento de los proyectiles. Einstein, al advertir que masa y energía eran equivalentes, extendió el principio en su teoría general de la relatividad para aplicarlo no sólo a objetos en reposo dotados de masa, sino también a todas las formas de energía, luz incluida. La audaz hipótesis de Einstein fue verificada en 1919 por Arthur Eddington, quien midió la desviación de la luz debida al campo gravitatorio del sol durante un eclipse.

El descubrimiento del positrón, o antielectrón, en 1932, planteaba una cuestión nueva: ¿Obedecía la antimateria a la ley física de la misma manera que la materia ordinaria? La solución que hoy se acepta llegó en 1957 con el teorema CPT de Gerhart Lüders, quien demostró que las operaciones matemáticas que transforman la descripción de una partícula en la descripción de su antipartícula dejan intactas las leyes de la física. Según la relatividad general, por tanto, la gravedad no hace ninguna distinción entre una partícula y una antipartícula; lo único que cuenta es la energía de la partícula. Como la energía de una antipartícula es la misma que la de la partícula correspondiente, la antimateria caerá al suelo exactamente igual que la materia.

Esta conclusión es válida si se toma la relatividad general de Einstein como teoría definitiva de la gravitación. Sin embargo, recientemente, muchos físicos han avanzado propuestas alternativas en las que la gravedad interaccionaría con otros aspectos de la materia distintos de la energía: el número cuántico, por ejemplo. Bajo esta nueva óptica, el teorema CPT sólo afirma que una antimanzana caería a una antitierra de la misma manera que una manzana cae a la tierra. Nada dice acerca de las antimanzanas que caigan a una tierra de materia ordinaria. En otras palabras, no hay razón para suponer que el principio de equivalencia se aplique a la antimateria. Conclusión que no debería sorprendernos si pensamos que todos los intentos de unificar en una sola teoría los dos cuerpos de doctrina en que se basaba el argumento convencional, la gravitación y la mecánica cuántica, han fracasado hasta ahora.

La unificación de la mecánica cuántica y la gravedad se ha convertido en el santo grial de la física del siglo XX. No sólo nadie lo ha conseguido, sino que, para mayor dificultad, las teorías más realistas predicen nuevos tipos de interacciones gravitatorias que causarían que una antipartícula cayera al suelo de manera distinta de una partícula ordinaria. Eso nos animó a proponer, hace unos años, la medición de la aceleración gravitatoria de los antiprotones. Experimento que habría de traer una prueba decisiva de la existencia de nuevas interacciones gravitato-



1. GALILEO, de pie en el centro de este fresco que se conserva en el museo de zoología La Specola (Florencia), explica la aceleración uniforme de una esfera que baja rodando por un plano inclinado. Tal

rias. Se están construyendo ya los aparatos para el experimento y, si todo va bien, habrá resultados a principios de 1991.

Desde hace muy poco tiempo, los investigadores, guiados por nuevos experimentos y planteamientos teóricos, han observado ciertas anomalías que sugieren que el principio de equivalencia tal vez no sea cierto bajo determinadas condiciones. Durante siglos, sin embargo, los físicos tuvieron sus buenas razones para fiarse del principio: ha resistido muchas pruebas rigurosas, demostrando su exactitud con precisión extraordinaria.

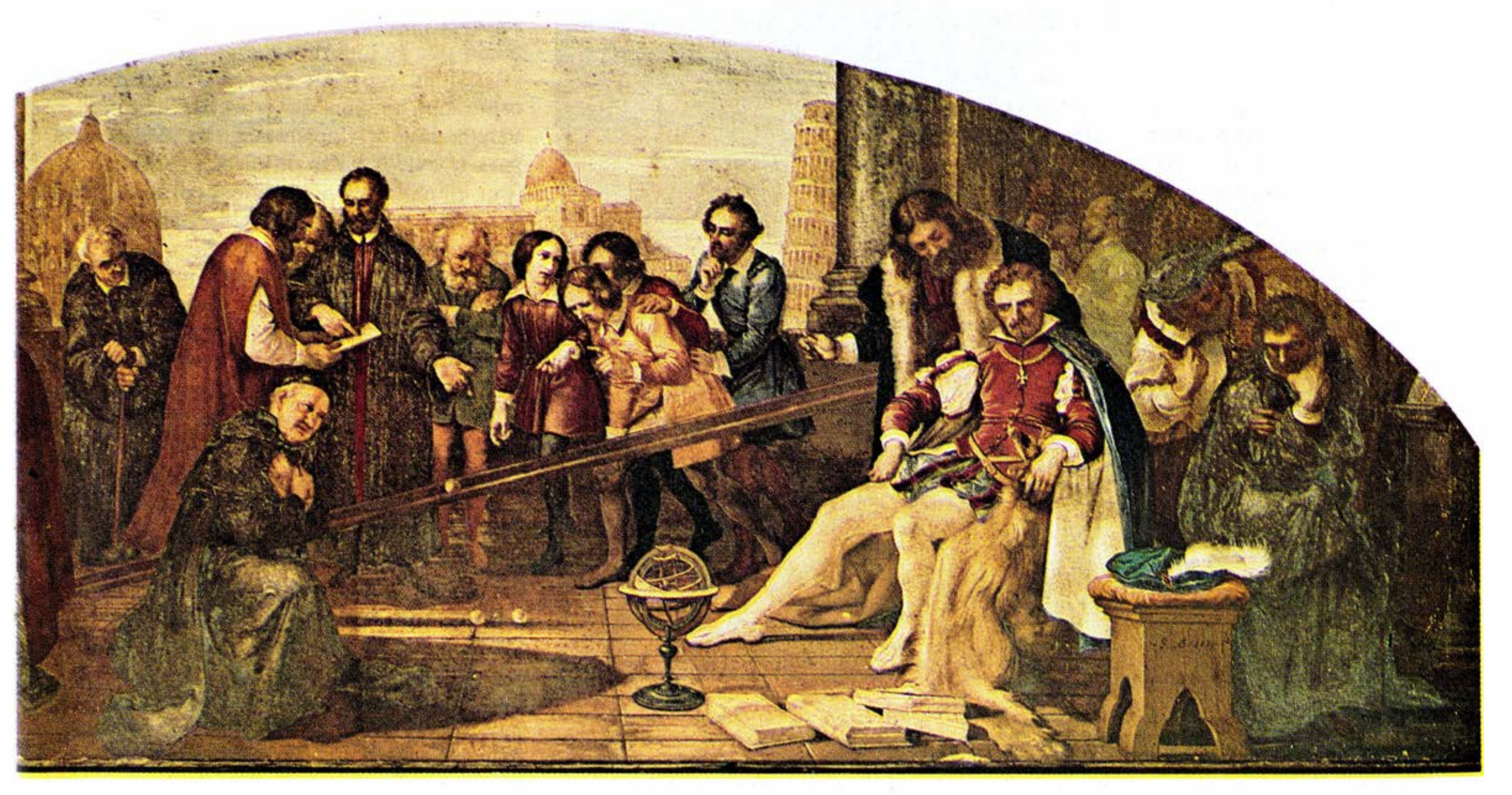
El propio Newton sometió a prueba el principio de equivalencia mediante algunos experimentos. Para comprenderlos, es necesario retocar un poco la formulación del principio. Newton introdujo la noción de masa en dos contextos. En su segunda ley del movimiento, la fuerza sobre un objeto es igual a la masa inerte por la aceleración. En su ley de la gravitación, la fuerza de atracción entre dos objetos es proporcional al producto de sus masas gravitatorias e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre ellos (de ahí que se llame ley del inverso del cuadrado). La masa inerte es una cantidad cinemática relacionada con el movimiento. La masa gravitatoria es una "carga": un objeto siente una fuerza gravitatoria en proporción a su masa gravitatoria, de la misma manera que sentiría una fuerza electromagnética en proporción a su carga eléctrica.

Aunque se trata de nociones totalmente distintas, Newton mantenía que ambos tipos de masa, inerte y gravitatoria, eran equivalentes. Para contrastar la idea llevó a cabo experimentos con péndulos. El período de oscilación de un péndulo viene dado por el producto de dos factores: uno dependiente de la longitud y otro dependiente de la razón entre la masa inerte y la masa gravitatoria. Newton encontró que el período quedaba determinado con el factor dependiente de la longitud; vio también que la razón de los dos tipos de masas era siempre la unidad: en otras palabras, la masa gravitatoria y la inerte eran iguales. Verificó así el principio de equivalencia con una precisión de una parte en 1000. (A finales de la década de 1820, Friedrich Wilhelm Bessel realizó experimentos que aumentaron la precisión hasta una parte en 60.000.)

El siguiente avance reseñable en la comprobación del principio de equivalencia lo promovió el barón húngaro Roland Eötvös. En los años 1880 este reputado geofísico desarrolló una balanza de torsión con la que sondear la Tierra midiendo las variaciones del campo gravitatorio. Con ayuda de la balanza podía cartografiar los campos gravitacionales locales y deducir por tanto anomalías de masa locales, de las cuales las más interesantes eran las asociadas con depósitos minerales. La balanza era tan precisa que, a pesar del tiempo que requería cada medición, era un instrumento geofísico de uso corriente hasta bien entrado este siglo.

Eötvös cayó en la cuenta de que su balanza de torsión podía utilizarse para comprobar el principio de equivalencia colocando objetos de distintos materiales en los extremos opuestos de la balanza. La fuerza resultante que actuaba sobre cada objeto constituía una combinación de la atracción gravitatoria de la Tierra, proporcional a la masa gravitatoria del objeto, y la fuerza centrífuga debida a la rotación de la Tierra, proporcional a la masa inerte del objeto. Si se pusieran dos materiales distintos en la balanza y la razón entre la masa gravitatoria y la masa inerte de uno no fuera igual a la del otro, la balanza de Eötvös giraría.

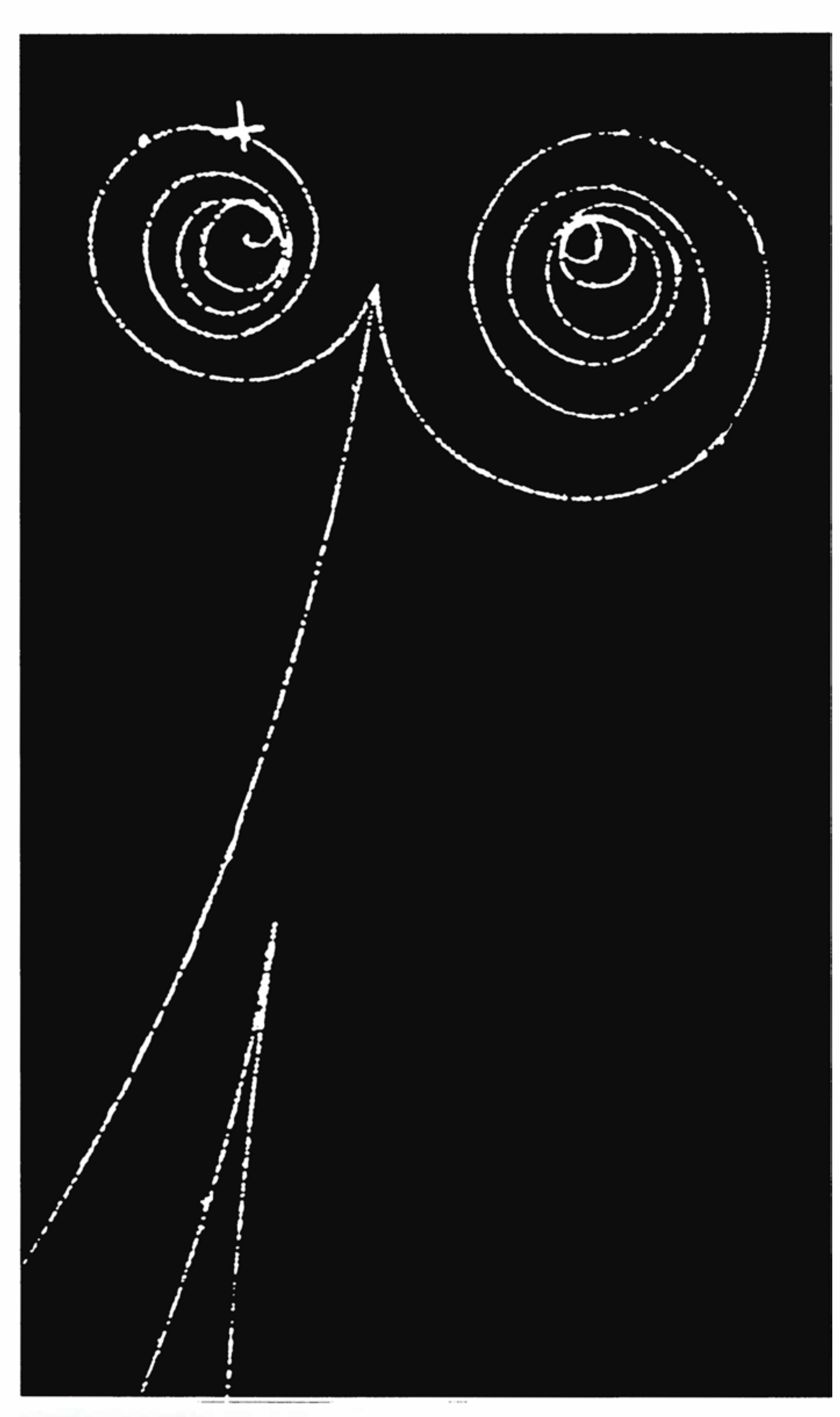
En 1890, Eötvös publicó unos resultados que mostraban la igualdad de las masas gravitatoria e inerte de diversas sustancias con una precisión de cinco partes en 10^8. Tras mejorar su trabajo en 1909, llegó a la conclusión de que un



experimento le condujo a razonar que, si objetos de distinta masa y composición caían desde cierta altura, llegarían todos ellos al suelo en el mismo instante. Este principio de equivalencia, fundamental para la teoría de la gravitación, está recogido por la mitología popular en la historia según la cual Galileo dejó caer dos piedras desde la torre inclinada de Pisa, que se ve al fondo (*detrás de la columna*). Una comprobación moderna del principio consistirá en medir la aceleración gravitatoria de los antiprotones. Según la teoría de la supergravedad y la teoría de cuerdas, los antiprotones deben caer más deprisa que los protones.

límite congruente con la precisión de su experimento era de cinco partes en 10^9. Más allá de este límite, encontró discrepancias entre distintos tipos de materiales que atribuyó a errores experimentales. (Más adelante volveremos sobre esto.)

En las décadas de 1960 y 1970, Robert H. Dicke y Vladimir B. Braginsky realizaron, cada uno por su cuenta, experimentos parecidos a los de Eötvös, en los que midieron la razón entre masa inerte y masa gravitatoria de algunos objetos, pero en el campo gravitatorio del Sol en vez del terrestre; descubrieron que el principio de equivalencia se satisfacía hasta una precisión de cinco partes en 10^{11} y 10^{12}, respectivamente. Se consiguió una precisión parecida para la igualdad de la masa gravitatoria y masa inerte de la Tierra y la Luna a partir de mediciones de la órbita lunar en torno a la Tierra, cuando el propio sistema Tierra-Luna gira en torno al Sol, utilizando para ello espejos dejados en la superficie de la Luna por los astronautas de la misión Apolo. Incidentalmente, este último experimento demostró que la gravedad del Sol actúa sobre la energía gravitatoria que liga la materia a la Tierra; en pocas palabras, que la gravedad atrae a la gravedad.



2. UN PAR ELECTRON-POSITRON deja tras de sí una traza en forma de espiral bifurcada, visible en esta fotografía de cámara de niebla. Creados por un rayo gamma que choca violentamente con un núcleo de hidrógeno, el electrón y su compañero de antimateria tienen la misma masa y cargas eléctricas opuestas: se curvan, pues, siguiendo direcciones opuestas en el campo magnético de la cámara. Las partículas y sus antipartículas poseen números cuánticos opuestos. Si se dispone de energía suficiente para conservar el momento y suministrar masa (de acuerdo con $E = mc^2$), pueden crearse a pares, ya que su número cuántico total será cero. Una partícula y una antipartícula pueden aniquilarse entre sí dando lugar a un destello de energía. Los antiprotones se crean en aceleradores lanzando partículas de alta energía contra blancos.

La idea de que la propia energía gravitatoria esté sujeta a la fuerza de la gravedad es una consecuencia de la revolución que sufrió la física aproximadamente en los días de los experimentos de Eötvös. Nos referimos a las teorías especial y general de la relatividad que formuló Einstein. El actual debate acerca de la existencia de nuevas fuerzas relacionadas con la gravedad surge de intentos de generalizar la teoría de la gravitación de Einstein; vale, pues, la pena repasar la historia de sus trabajos con algún detalle.

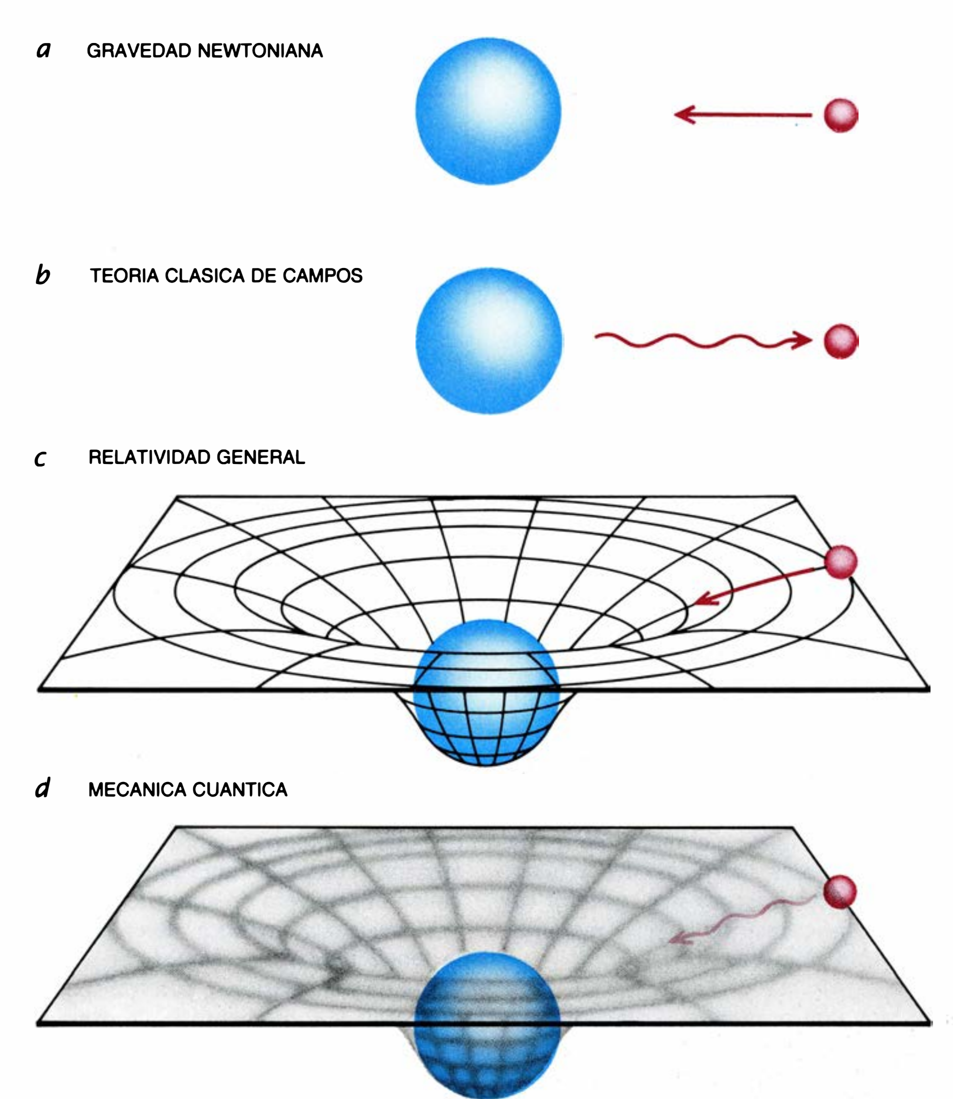
La teoría de la relatividad general se fraguó cuando Einstein se aprestaba a resolver un desafío fundamental, planteado por su anterior trabajo sobre la relatividad especial, en torno al concepto newtoniano de gravedad. Pues aunque la teoría newtoniana es idónea para la mayor parte de casos prácticos (por ejemplo, enviar una expedición a la Luna), resulta inaceptable para los físicos teóricos porque supone que la gravedad actúa instantáneamente a distancias infinitas, con lo que viola la restricción que la relatividad especial impone a cualquier velocidad —de objetos, de energía, de propagación de una fuerza— al establecer como límite la velocidad de la luz.

En la teoría clásica de campos relativistas, las fuerzas quedan reconciliadas con la relatividad especial gracias a la introducción de un campo que transporta energía y momento mediante las partículas de materia que interaccionan (tales como electrones y protones) a una velocidad no mayor que la de la luz. El intercambio de la energía y el momento que transporta el campo produce la fuerza que experimentan las partículas. Por ejemplo, los electrones que oscilan en una antena emisora producen un campo de ondas de radio que se propaga a través del espacio y ejerce

una fuerza sobre los electrones de la antena receptora.

Con la aparición de la teoría de campos relativista, era natural que los físicos indagaran las posibles formas que adquiere un campo gravitatorio. James Clerk Maxwell, observando que tanto la gravitación como la ley de Coulomb (que describe la fuerza entre partículas dotadas de carga eléctrica) son relaciones de cuadrado inverso, tanteó la posibilidad de que su propia teoría de la electrodinámica, oportunamente modificada, describiera la gravedad. Por supuesto que habría cosas que cambiar, ya que la fuerza electrodinámica desencadenaba repulsión entre cargas iguales, mientras que la gravedad producía atracción. Maxwell se las ingenió para satisfacer esta condición cambiando el signo de la energía del campo y haciéndola negativa, pero se dio cuenta en seguida de que la teoría resultante adolecía de un mal insoluble; si la energía del campo fuera negativa, un sistema ganaría energía gravitando, de manera que su energía aumentaría infinitamente.

La primera teoría relativista de la gravitación que gozó de coherencia matemática interna lo construyó en 1913 Gunnar Nordström, antes de la teoría de la relatividad general de Einstein. La teoría de Nordström concordaba con todos los experimentos gravitatorios realizados hasta aquel momento. Einstein y Adriaan D. Fokker descubrieron que las ecuaciones del campo gravitatorio de Nordström describían en realidad un espacio-tiempo curvo: era como si uno hubiera intentado describir la superficie de una esfera en términos de una superficie plana y luego se diera cuenta de que se puede describir la misma superficie de manera más natural con coordenadas esféricas. La teoría de Nordström introdujo así, sin pretenderlo, la idea de un espacio-tiempo curvo.



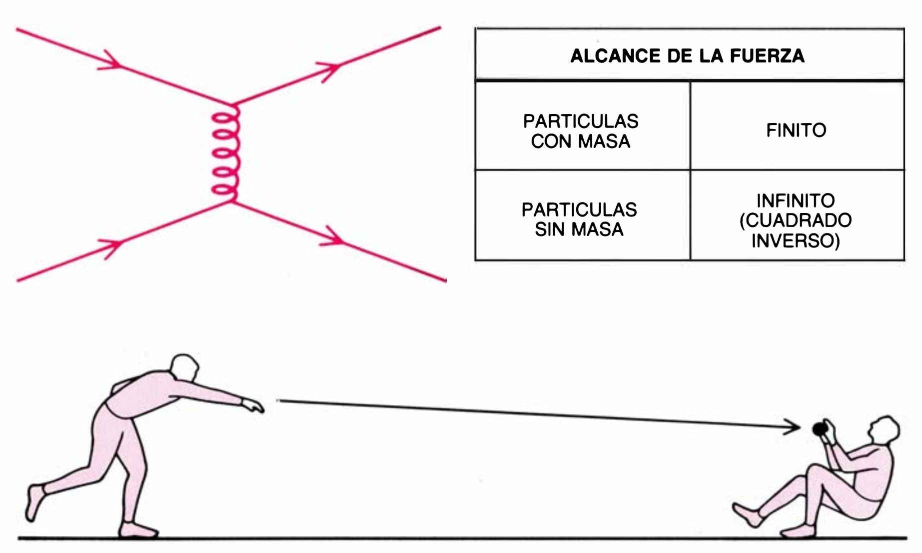
3. LAS TEORIAS DE LA GRAVEDAD describen la fuerza que se ejerce entre dos masas. Newton, que relacionó la intensidad de la gravitación con la masa de los objetos y la distancia entre ellos, supuso que la fuerza actúa a distancia instantáneamente (*a*). La teoría de la relatividad especial demostró, sin embargo, que nada puede moverse a mayor velocidad que la luz. La teoría clásica de campos introdujo el concepto de un campo que propaga la fuerza a velocidad finita (*b*). Einstein se dio cuenta de que las ecuaciones de campo para la gravitación describían un espacio-tiempo que se curvaba en las proximidades de los objetos con masa. En su teoría de la relatividad general, la gravedad se manifiesta mediante el movimiento de objetos a lo largo de trayectorias que siguen el camino más corto posible en un espacio-tiempo curvo (*c*). La teoría de la mecánica cuántica, por el contrario, asegura que la trayectoria a seguir se encuentra indeterminada (*d*).

De acuerdo con el modelo de Nordström el campo gravitacional sólo actúa sobre objetos que tienen masa en reposo. Ahora bien, la relatividad especial sostiene que la energía es equivalente a la masa. ¿Por qué, pues, no habría de estar sujeta también la energía a la fuerza de la gravedad? Einstein recordará ese razonamiento como la idea más feliz de su vida, lo que le llevó a la teoría de la relatividad general.

De la teoría einsteniana se infería, asimismo, una curvatura del espacio-tiempo en la proximidad de los objetos masivos. Además, como la teoría describe un campo gravitatorio que se acopla a la energía y al momento, en vez de a la masa, predice que la gravedad debe desviar las formas de energía carentes de masa, tales como la luz. Einstein propuso que el efecto podía comprobarse midiendo un desplazamiento aparente en la posición de las estrellas cercanas al limbo solar durante un eclipse. La predicción fue confirmada por la expedición africana de Eddington, en 1919. La teoría de Einstein explicaba también el desplazamiento anómalo del perihelio de Mercurio y el corrimiento hacia el rojo de la luz proveniente de estrellas o planetas (verificado más tarde en el experimento de Pound-Rebka).

Las teorías de la gravedad en las que la fuerza se manifiesta a través de la curvatura del espacio-tiempo se denominan "teorías métricas"; a ellas pertenecen las de Nordströn y Einstein. En tales teorías, la fuerza se manifiesta por la curvatura del espacio-tiempo, que da forma a la trayectoria que sigue el objeto en su movimiento. Formulada de esta manera, la fuerza no depende de la composición de los objetos sobre los que actúa. (Obsérvese que esta es otra manera de enunciar el principio de equivalencia.)

La teoría general de la relatividad, con el éxito de su sorprendente y revolucionaria concepción del universo, constituye uno de los mayores logros intelectuales de nuestro siglo. Pero a pesar de la aureola que la rodea, no debemos olvidar que no es la única capaz de explicar todos los hechos experimentales relativos a la gravedad. Más aún. Disponemos ya de indicios de ciertos efectos gravitatorios que violan, según se aprecia, el principio de equi-



ALCANCE DE LA FUERZA	
PARTICULAS CON MASA	FINITO
PARTICULAS SIN MASA	INFINITO (CUADRADO INVERSO)

4. TEORIA CUANTICA DE CAMPOS: introdujo la idea de una partícula que actúa de intermediario de la fuerza. Dos partículas, en mutua interacción, intercambian una tercera partícula que transfiere energía y momento de una a otra; lo hacen de manera parecida a la transferencia de energía y momento que tiene lugar entre dos jugadores a través de la pelota. Las partículas con masa tienen un alcance finito. El alcance de las partículas sin masa —fotones (la luz) y gravitones (transportadores de la gravedad)— es infinito.

valencia; de confirmarse los datos, ninguno de ellos se explicaría apelando a la relatividad general clásica. Pero sí podrían encajar en el marco de teorías más recientes, surgidas del esfuerzo por unificar la relatividad general con el otro gran pilar de la física moderna: la teoría cuántica.

Hay una profunda incompatibilidad entre la mecánica cuántica y los principios de equivalencia en que se basan las teorías de la gravedad clásicas, no cuánticas. Por ejemplo, según el principio de equivalencia, la posición y la velocidad inicial de un objeto determinan la trayectoria exacta que seguirá éste al caer libremente en un campo gravitatorio. Sin embargo, la mecánica cuántica nos dice que la trayectoria del objeto es indeterminada y se rige por la probabilidad [véase "Gravedad cuántica" por Bryce S. DeWitt; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, febrero de 1984]. Por tanto, el principio de equivalencia no puede ser un concepto exacto en el marco de una descripción cuántica de la gravedad. A nadie debería sorprender que una teoría cuántica de la gravitación contenga interacciones que violen el principio de equivalencia.

La mecánica cuántica alteró de raíz la teoría clásica de campos. Según el punto de vista clásico, quien transporta la energía y el momento es un campo. La mecánica cuántica afirma que esta energía y momento existen en unidades discretas, llamadas cuantos, que pueden describirse como partículas. En la teoría cuántica de campos se habla de las fuerzas en términos de un intercambio entre tales partículas (un suceso análogo a la transferencia de energía y momento que tiene lugar cuando un jugador le lanza a otro una pelota de béisbol). El "intermediario" de las fuerzas electromagnéticas, por poner un caso, es el fotón o cuanto de luz. La intensidad de la fuerza resultante viene dada por la "intensidad de acoplamiento" de las partículas a la materia sobre la que actúan.

Las partículas transportadoras de las fuerzas tienen una masa en reposo definida (cero en el caso de los fotones) y un espín intrínseco, o momento angular, que puede tomar valores enteros o semienteros. En todas las fuerzas —gravedad, electromagnetismo, la fuerza débil responsable de la desintegración radiactiva, la fuerza fuerte que liga los núcleos atómicos— actúan de intermediarios partículas de espín entero, de lo que resultan fuerzas cuyo alcance queda determinado por el inverso de la masa de la partícula. Las fuerzas en las que intervienen partículas masivas, como la fuerza débil, actúan sólo sobre alcances finitos. Pero si median partículas sin masa, como es el caso del electromagnetismo y la gravedad, el alcance de la fuerza resulta ser infinito y su intensidad disminuye de manera inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre las partículas interaccionantes.

Se sabe que el espín de un campo está relacionado con la naturaleza de la fuerza: los campos con espines enteros impares pueden producir fuerzas atractivas y repulsivas; los de espines enteros pares, tales como los campos escalares (espín 0) y los tensoriales (espín 2), producen una fuerza únicamente atractiva. Por ejemplo, la electrodinámica de Maxwell puede describirse como un campo de espín 1 (la fuerza se transmite gracias al fotón, que tiene espín 1). La fuerza de este campo es atractiva entre partículas de cargas opuestas y repulsiva si las partículas tienen cargas del mismo signo.

Siguiendo este razonamiento, era de esperar que para describir una teoría de la gravedad sólo hicieran falta campos escalares o tensoriales cuyos mediadores fueran partículas de espín par. Se ha demostrado que si la relatividad general, basada en un campo tensorial, se replantea como teoría cuántica de campos, la fuerza gravitacional es producida por una partícula sin masa de espín 2, conocida por gravitón. Sin embargo, desde un punto de vista matemático, la versión cuántica de la relatividad general está plagada de incoherencias, motivo por el cual los físicos se han esforzado por extender la relatividad general para que la gravitación resulte más asequible a un enfoque cuántico.

Uno de los intentos que mayor interés reviste en el planteamiento cuántico de la gravedad es el de la clase de teorías conocidas por teorías de aforo ("gauge"). Clase ésta que abarca las

ESPIN	FUERZA ENTRE "CARGAS" SIMILARES	FUERZA ENTRE "CARGAS" OPUESTAS	EJEMPLOS
0 (ESCALAR)	ATRACCION	ATRACCION	PARTICULAS DE HIGGS, GRAVIESCALAR
1 (VECTOR)	REPULSION	ATRACCION	FOTON, GLUON, GRAVIFOTON
2 (TENSOR)	ATRACCION	ATRACCION	GRAVITON

5. LAS PARTICULAS DE ESPIN ENTERO actúan de intermediarias de las fuerzas de la naturaleza. Las partículas de espín par producen sólo fuerzas atractivas, mientras que las partículas de espín impar producen una fuerza atractiva o repulsiva según la materia interactuante tenga números cuánticos opuestos o iguales. Por ejemplo, para la fuerza electromagnética el mediador es el fotón de espín 1; en consecuencia, las partículas con la misma carga eléctrica se repelen entre sí y las dotadas de carga opuesta se atraen entre sí. El gravifotón podría producir repulsión entre materia y materia y atracción entre materia y antimateria.

SUPERGRAVEDAD

ESPIN ENTERO
PARTICULAS QUE
MEDIAN ENTRE LAS FUERZAS

ESPIN SEMIENTERO
FERMIONES PESADOS

GRAVITON ESPIN-2

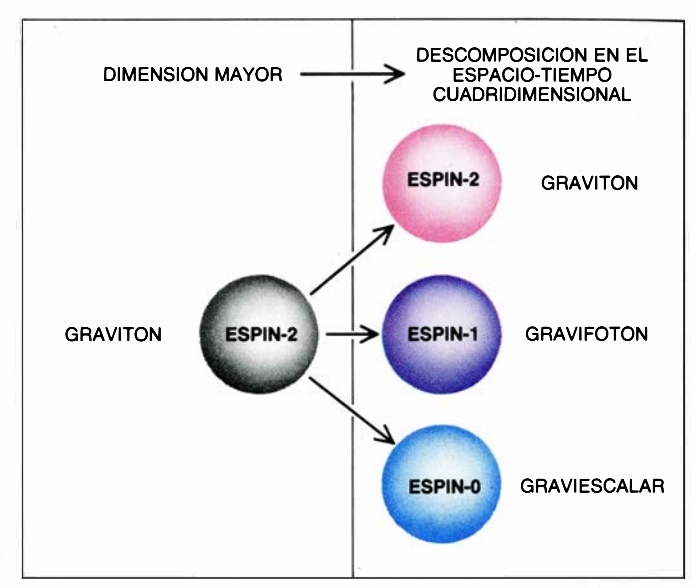
ESPIN-3/2 GRAVITINO

GRAVIFOTON ESPIN-1

ESPIN-1/2 GOLDSTINO

GRAVIESCALAR ESPIN-0

TEORIAS METRICAS



6. SEGUN DOS APROXIMACIONES TEORICAS habría nuevas interacciones relacionadas con la gravedad muy parecidas. En las teorías de supergravedad que aplican cuatro o más operaciones de "supersimetría" (*flechas*) el gravitón de espín 2 da lugar a una serie de nuevas partículas: el gravitino de espín 3/2, el gravifotón de espín 1, el goldstino de espín 1/2 y el graviescalar de espín cero. El gravifotón y el graviescalar serían los mediadores de las nuevas fuerzas. Otro cuerpo teórico, el de las teorías métricas, que describen las fuerzas en función de la curvatura del espacio-tiempo, llega a predicciones similares: un gravitón de espín 2 en más dimensiones se "descompone" en un gravitón de espín 2, uno o más gravifotones de espín 1 y graviescalares de espín cero.

teorías que describen las interacciones fuertes y electrodébiles: los actuales candidatos para la unificación en la así llamada teoría de gran unificación. Las teorías de aforo, que se fundan en cierto tipo de simetría interna, se han ganado la voluntad de los teóricos porque, con unos pocos parámetros iniciales, se puede seguir el cálculo de todos los fenómenos que abarca la teoría [véase "Supergravedad y la unificación de las leyes de la física", por Daniel Z. Freedman y Peter van Nieuwenhuizen; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, abril de 1978].

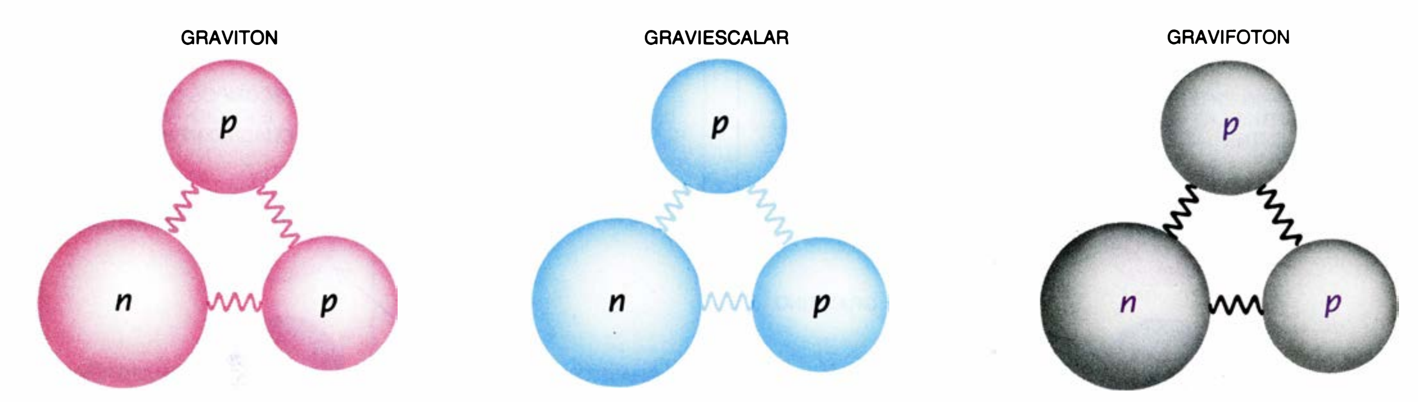
El éxito de las teorías de aforo sugiere que la falta de coherencia matemática de la relatividad general cuántica pueden superarse también introduciendo una supersimetría local. Cuando la relatividad general se amplía mediante supersimetrías locales se encuentra (en la mayoría de las versiones de tales modelos) que hay una partícula de espín semientero asociada a cada partícula de espín entero y viceversa, lo que da lugar a una cascada caleidoscópica de partículas nuevas: el gravitón de espín 2 tiene una compañera de espín 3/2, que posee una compañera de espín 1 (el gravifotón), que tiene una compañera de espín 1/2, que tiene una compañera de espín 0 (el graviescalar). (Algunos modelos describen más de una compañera para cada espín.) Estas nuevas compañeras son como estados cuánticos adicionales de la gravitación y su existencia parece asegurar que las teorías de supergravedad gozan de propiedades razonables para un campo cuántico (aunque tal vez imperfectas todavía). Todas las teorías de aforo de la gravedad cuántica sometidas hoy a examen encierran estados adicionales supersimétricos.

Las partículas de espín semientero en estas teorías llamadas de supergravedad se suponen de una masa extrema. Se cree que la energía de su masa en reposo se cifra en un billón de electronvolt, es decir, 1000 veces la del protón. Nunca se ha visto ninguna de estas hipotéticas partículas. Los defensores de las teorías de supergravedad esperan producirlas con los nuevos aceleradores: el tevatrón del Laboratorio Nacional Fermi, el LEP del laboratorio europeo de física de partículas (CERN) y el supercolisionador superconductor, en fase de proyecto.

Por su parte, las partículas de espín entero son, al igual que el gravitón, mediadoras de fuerzas y generarían nuevos efectos con una intensidad comparable a la gravedad, pero con algunas notables diferencias. Se espera que tanto el graviescalar como el gravifotón tengan una masa en reposo, de manera que su alcance sea finito en vez de infinito. Además, el graviescalar sólo producirá atracción, mientras que el efecto del gravifotón dependerá de que las partículas interaccionantes sean o no distintas. Entre materia y materia (o antimateria y antimateria) el gravifotón producirá repulsión; pero entre materia y antimateria producirá atracción. De este modo, en cuanto a la materia ordinaria la fuerza atractiva graviescalar quedará más o menos anulada por la fuerza repulsiva del gravifotón. Sin embargo, entre materia y antimateria tanto el graviescalar como el gravifotón producirán una fuerza atractiva; se sumarán, pues. En el experimento con antiprotones se intentará hallar una prueba de esta atracción adicional.

Importa destacar que un grupo distinto de teorías predice efectos similares desde una aproximación a la cuantización de la gravedad bajo un prisma totalmente diferente. Ciertas teorías métricas recientes que contienen más dimensiones que las cuatro del espacio-tiempo convencional predicen también la presencia de nuevas partículas. Este trabajo nos hace retroceder más de 60 años, hasta las investigaciones de Theodor Franz Éduard Kaluza y Oskar Klein, que formularon un modelo de gravitación en un espacio-tiempo de más dimensiones y luego lo "proyectaron" sobre el espacio-tiempo ordinario, en un esfuerzo por obtener una teoría unificada de la gravedad y el electromagnetismo [véase "Las dimensiones ocultas del espacio-tiempo", por Daniel Z. Freedman y Peter van Nieuwenhuizen; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, mayo de 1985].

Al no lograr imponerse, el modelo de Kaluza-Klein acabó olvidado durante medio siglo. En el último decenio, sin embargo, varios físicos teóricos lo han desenterrado y han empezado a considerar qué pasaría cuando el modelo se generalizara a más dimensiones. Encontraron que un gravitón de espín 2 en más dimensiones tendría,

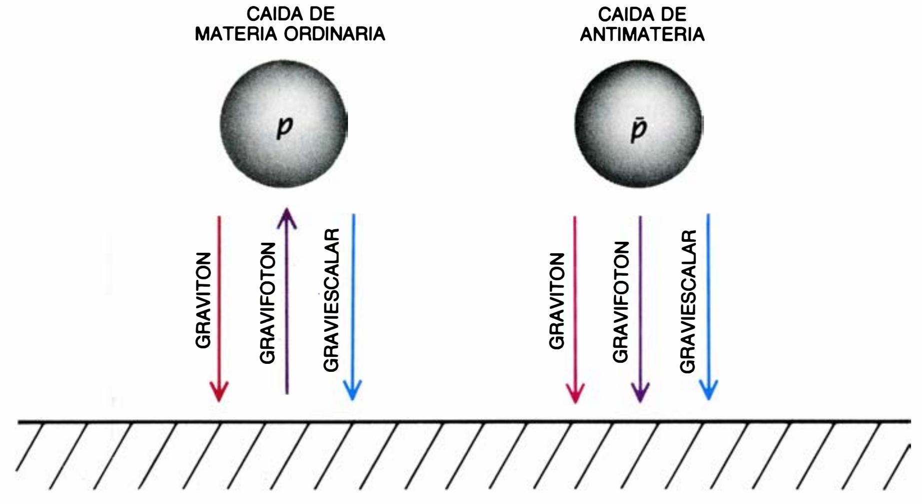


7. VIOLACIONES del principio de equivalencia en el marco de las nuevas teorías. Esa posibilidad se funda en que las tres partículas intermediarias de la gravedad y las fuerzas relacionadas se acoplarían a la masa y a la energía con intensidades distintas, según se sugiere aquí con las intensidades variables de color. El gravitón se acopla con igual intensidad a la masa (*esferas*) y a la energía de enlace (*muelle*). El graviescalar se puede acoplar a la masa de manera distinta de como lo hace con la energía de enlace, de suerte que los elementos con muchos protones y neutrones ligados pueden experimentar una fuerza más débil que los que sólo contienen algunos nucleones ligados. El gravifotón podría acoplarse a los numeros cuánticos internos, tales como el número bariónico, en vez de acoplarse a la masa o a la energía de enlace. Una prueba consiste en comparar la fuerza gravitacional en elementos con distintas proporciones de protones y neutrones, pues los protones poseen una masa inerte menor que los neutrones, e igual número bariónico. Tanto los efectos del graviescalar como los del gravifotón sólo se pondrán de manifiesto en un alcance finito que la teoría predice que rondará entre los centenares de metros y unos cientos de kilómetros.

cuando se contemplara desde cuatro dimensiones, varias partes: un gravitón de espín 2 cuadridimensional, un campo vectorial de espín 1 correspondiente a un gravifotón y un campo escalar unidimensional de espín 0, correspondiente al graviescalar. El proceso es análogo a considerar un vector en tres dimensiones y proyectarlo sobre un plano: dos de las dimensiones definirían un vector en el plano y la tercera dimensión vertical definiría un punto. (Tal como sucede en la supersimetría, en algunos modelos se proponen muchas compañeras para cada espín.) Así, pues, tanto las teorías no métricas de supergravedad como las métricas de más dimensiones conducen a consecuencias de sorprendente parecido.

No obstante, ninguna de las teorías de gravedad cuántica puede ufanarse de haber alcanzado consistencia matemática. A pesar de ello, Joel Scherk, no mucho antes de su muerte en 1980, halló que las teorías de gravedad cuántica podían tener consecuencias físicas medibles en el mundo de la materia ordinaria. Así, el graviescalar y el gravifotón no tienen masa nula y, por tanto, no se comportan de acuerdo con la ley newtoniana del inverso del cuadrado. Eso alienta la búsqueda de un indicio experimental de violación de la ley de Newton a distancias inferiores a varios cientos de metros o de kilómetros, pues ése se cree que es el alcance de los efectos que ejercerían las nuevas partículas.

También podrían buscarse experimentalmente las diferencias que puede haber en las intensidades de acoplamiento del graviescalar y el gravifotón a diferentes componentes de la materia, tales como la energía de enlace o el número bariónico (el número total de protones y neutrones). Las teorías permiten que el graviescalar se acople a la energía de enlace con una intensidad distinta de aquella con la que se acoplaría a la masa en reposo de las partículas elementales. En este sentido, la fuerza graviescalar podría ser mayor sobre un gramo de hidrógeno que sobre un gramo de hierro, pues por cada 56 átomos de hidrógeno no ligados hay un átomo de hierro que contiene 56 protones y neutrones ligados. Por otro lado, el gravifotón debe acoplarse a algún número cuántico conservado de las partículas elementales, tal como el número total de bariones o de quarks, o la suma de bariones y leptones (tales como los electrones). Por tanto, el gravifotón producirá también una fuerza dependiente de la composición de la materia. Con ello se concluye que las dos nuevas fuerzas pueden violar el principio de equivalencia.



8. NUEVAS PARTICULAS provocarían que la materia ejerciera una fuerza sobre la antimateria distinta de la fuerza que desarrollaría sobre la materia ordinaria. El gravitón y el graviescalar producirían atracción en ambos casos, pero el gravifotón instaría la repulsión en el caso de la materia y la atracción en el caso de la antimateria. Si los efectos del gravifotón y el graviescalar son casi iguales, se anularían mutuamente en las interacciones entre materia ordinaria, pero no en el caso de interacciones entre materia y antimateria, en donde se sumarían. La antimateria caería al suelo antes que la materia, quizás en un 14 por ciento o más.

Según hemos visto, las teorías actuales predicen que dos leyes físicas que han gozado de indiscutida aceptación durante mucho tiempo se modificarán: las masas no nulas del graviescalar y el gravifotón implican que, dentro de su alcance finito, la ley gravitatoria del inverso del cuadrado postulada por Newton no será cierta, y la naturaleza de las nuevas fuerzas que dependen de la composición material significa que el principio de equivalencia tampoco quedará en pie.

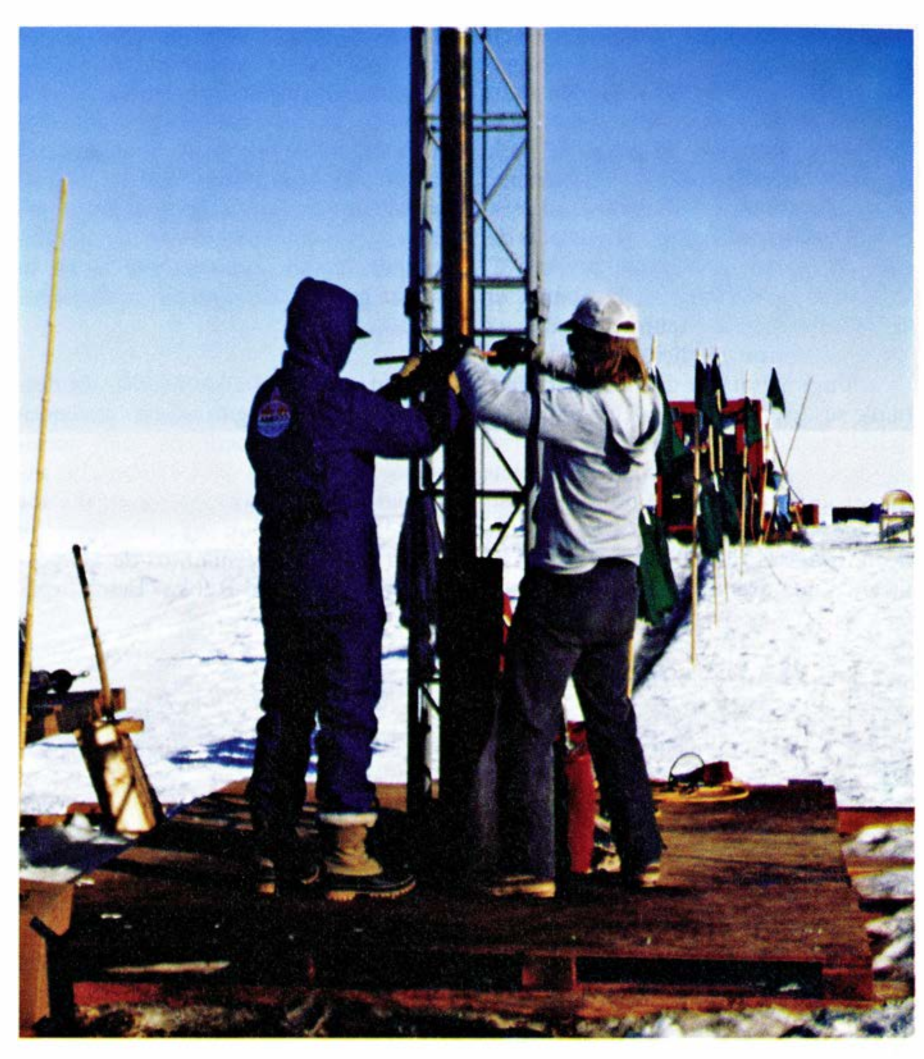
Para la materia ordinaria, y dentro del campo gravitacional terrestre, se espera que las violaciones de la ley del inverso del cuadrado sean minúsculas. La razón estriba en que las fuerzas en las que median el graviescalar y el gravifotón se anularían casi por entero. Puede que Frank D. Stacey y Gary J.

Tuck, de la Universidad de Queensland, junto con sus colaboradores, hayan encontrado un pequeño efecto residual al medir la fuerza gravitacional local a varias profundidades dentro de unos pozos de minas en Australia. Después de haber corregido los efectos gravitatorios de la geología local, las mediciones seguían estando en desacuerdo con las predicciones de la teoría newtoniana. En cambio, los datos encajaban más o menos bien con la existencia de una sola fuerza repulsiva 100 veces más débil que la gravedad ordinaria con un alcance de unos centenares de metros, o de una fuerza repulsiva y otra atractiva de intensidades aproximadamente iguales a la de la gravedad ordinaria que se anulasen, salvo en una parte en 100, y con alcances inferiores a 450 kilómetros.

El resultado australiano, así como otros más recientes, también anómalos, de los que informaron Albert T. Hsui, de la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign, y Donald H. Eckhardt y sus colaboradores, del Laboratorio Geofísico de las Fuerzas Aéreas de los EEUU, son hoy objeto de revisión por distintos investigadores y centros: Mark E. Ander, Mark A. Zumberge y sus colaboradores del Laboratorio Nacional de Los Alamos, la Institución de Oceanografía Scripps, la Universidad de Texas en Dallas, la Amoco Corporation y el Instituto Scott de Investigación Polar. El pasado verano midieron la gravedad aprovechando una perforación existente en la placa de hielo de la Groenlandia continental, donde la composición uniforme del hielo en el entorno ayuda a eliminar los errores de sus análisis. Para dentro de varios meses se esperan los resultados.

Se ha levantado, asimismo, una gran polvareda en torno a la revisión del experimento de Eötvös de 1909, que ha llevado a cabo Ephraim Fischbach, de la Universidad de Purdue. El grupo encontró una correlación entre las pequeñas discrepancias de los resultados de Eötvös mencionadas antes y la razón entre número bariónico y masa inerte de las distintas sustancias que Eötvös había empleado en sus mediciones. El grupo de Purdue sugiere que esta correlación puede ser indicativa de una "quinta fuerza" de la naturaleza completamente nueva, aunque nosotros creemos que, por mostrar aproximadamente la misma intensidad que la gravedad, tal fuerza sería un nuevo aspecto de la gravedad misma. La respuesta final nos la dará el experimento y la teoría.

Se han proyectado nuevos experimentos para comprobar los efectos dependientes de la composición. En el momento de escribir este artículo, tenemos noticias de cuatro: dos resultados negativos, de un grupo de la Universidad de Washington, dirigido por Eric G. Adelberger, y de un grupo de la Oficina Nacional de Pesos y Medidas, dirigido por James E. Faller; y dos resultados positivos, de Peter Thieberger, del Laboratorio Nacional de Brookhaven, y de Paul E. Boynton y sus colaboradores, de la Universidad de Washington.



9. EXTRACCION DE UN MEDIDOR DE GRAVEDAD, de un profundo pozo de una perforación en la placa de hielo de Groenlandia, situado a unas millas al sur del Círculo Artico. El instrumento, de medio millón de dólares, mide la fuerza gravitacional local en varios lugares hasta una profundidad de 1600 metros con una precisión de una parte en 100 millones. El medidor, que suele usarse en prospecciones petrolíferas, se emplea para comprobar la posible existencia de nuevas interacciones relacionadas con la gravedad. En la fotografía se distingue a Casey Rohn, de la Polar Ice Coring Office de la Universidad de Nebraska, y a James Wirtz, de Amoco. Ted Lautzenhiser se encuentra en el interior de la cabina roja que controla la grúa.

Todos los experimentos descritos hasta aquí toman en consideración la aceleración de la materia ordinaria en el campo gravitatorio de la Tierra. Pero pensemos cómo cambian las cosas si se sustituye materia por antimateria. Un experimento así constituiría la prueba definitiva del principio de equivalencia. Aquí, el efecto del gravifotón es atractivo, igual que la fuerza graviescalar. La consecuencia es que en vez de anularse los dos efectos se sumarían. Por tanto, la antimateria experimentaría una aceleración hacia la Tierra mayor que la materia.

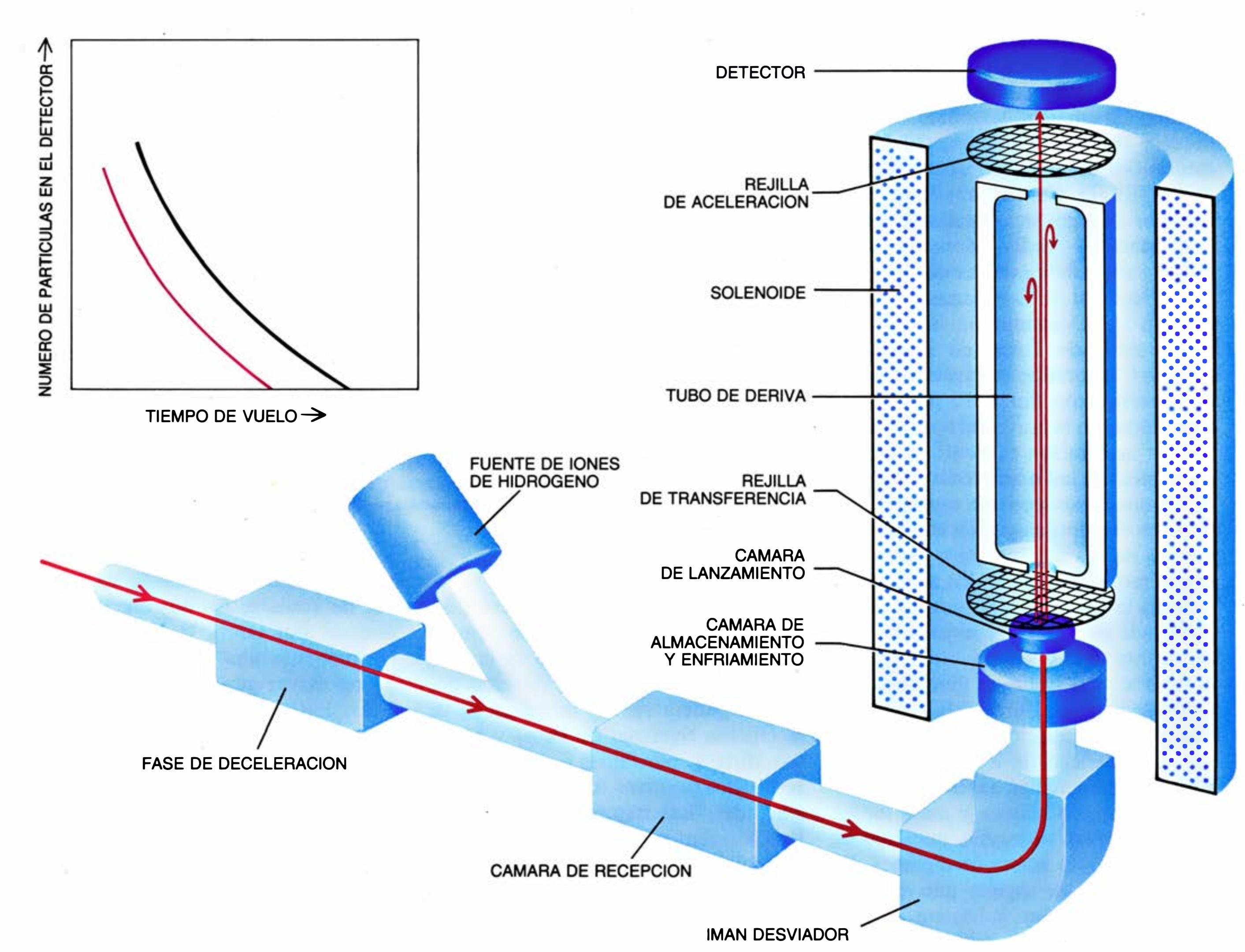
En 1982, motivados por anteriores debates acerca de esta posibilidad, dos de los autores propusieron un experimento para medir la aceleración gravitatoria de los antiprotones en el anillo de antiprotones de baja energía (LEAR) del CERN. Desde entonces se han sumado otros físicos de Los Alamos, Universidad de Rice, Universidad de Texas A.&M., Centro de Investigación Ames de la NASA, Universidad de Génova, Universidad de Pisa y CERN. Con el experimento se extraerán antiprotones del LEAR, se enfriarán por encima del cero absoluto y se enviarán en grupos de 100 a un tubo de deriva en el que se medirá el tiempo que tarden en alcanzar la parte superior. Los iones negativos de hidrógeno, que tienen la

misma carga y aproximadamente la misma masa que el antiprotón, proporcionarán un patrón de tiempo de vuelo para la materia ordinaria. Se comparará el resultado con el tiempo de vuelo de los antiprotones, a fin de determinar si los antiprotones sufren una aceleración gravitatoria mayor. El método del tubo de deriva es original de Fred C. Witteborn y William M. Fairbank, en la Universidad de Stanford cuando en 1966 realizaron mediciones de la aceleración gravitatoria del electrón. Fairbank se dispone a acometer ahora un experimento con positrones, convenientemente modificado, que complete nuestro experimento de antiprotones.

Esperamos que con el experimento de la gravedad de los antiprotones se alcance una precisión superior al 1 por ciento. Si existen realmente interacciones vectoriales y escalares con intensidades de acoplamiento cercanas a la de la fuerza gravitatoria normal y alcances de unos 450 kilómetros, el antiprotón caería con una aceleración un 14 por ciento mayor que la de la materia ordinaria. Si las intensidades de acoplamiento fueran mayores que la de la fuerza gravitatoria normal, el efecto sería aún mayor.

Aun cuando el experimento no descubriera ningún efecto desconocido, la primera medición de la aceleración gravitatoria de la antimateria extendería los experimentos gravitatorios a nuevos territorios, tal como hicieron en su día los experimentos de Eötvös-Dicke y de Pound-Rebka. Estos experimentos obtuvieron los resultados que eran de esperar, según la teoría entonces reinante. Pero, por su belleza y claridad, han merecido pasar a la historia de la física.

Ahora bien, ¿qué sucedería si el experimento con antimateria obtuviera un resultado contrario a la explicación clásica de la gravitación? ¿Cómo convencernos a nosotros mismos y al resto de la comunidad de físicos de que el resultado no se debió a un error experimental? Cuando planteamos esa objeción a dos miembros del equipo experimental, Ron Brown y Nelson Jarmie, sus ojos se iluminaron. Su respuesta lo decía todo: "Nos gustaría encontrarnos con ese problema". Cualquiera que sea el final, todos nosotros esperamos ansiosamente los resultados.



10. EL EFECTO DE LA GRAVEDAD sobre los antiprotones se medirá en el anillo de antiprotones de baja energía (LEAR) instalado en el laboratorio europeo de física de partículas (CERN). Los antiprotones se extraen del LEAR a dos millones de electronvolt, se desaceleran hasta una energía entre 10.000 y 20.000 electronvolt y se capturan en la cámara de recepción y la cámara de almacenamiento, donde se enfrían hasta 10 grados Kelvin (−263 grados Celsius). Se lanzan luego, en paquetes de 100, hacia un tubo de deriva de un metro de altura. Los antiprotones más útiles para el experimento tendrán una velocidad inicial media de cuatro metros por segundo. A medida que se desplacen hacia arriba, el tirón de la gravedad los frenará. Por tanto, las partículas más energéticas llegarán primero al detector y las menos energéticas arribarán más tarde. Habrá, por último, un intervalo de corte, después del cual ya no llegarán más partículas hasta el detector porque las partículas lentas carecerán de velocidad suficiente para alcanzar la zona de la rejilla de aceleración antes de que su movimiento ascendente se anule por la gravedad. El experimento medirá y comparará, por separado, el tiempo de corte para antiprotones y para iones de hidrógeno negativos (*curva negra*), que tienen la misma carga y casi la misma masa que los antiprotones. Si la antimateria estuviese sujeta a una fuerza gravitacional hacia abajo más intensa que en el caso de la materia ordinaria, los antiprotones (*curva coloreada*) tendrían un tiempo de corte más corto que los iones de hidrógeno.

Anticuerpos catalíticos

Una nueva clase de moléculas conjuga la enorme diversidad de los anticuerpos con el poder que hace de las enzimas útiles inestimables de la tecnología, medicina e investigación básica

Richard A. Lerner y Alfonso Tramontano

¿Pueden crearse anticuerpos que actúen de enzimas? Ambos tipos de proteínas parecen haber evolucionado para desempeñar tareas diferentes. Las enzimas se distinguen por su poder catalítico, es decir, su capacidad para acelerar los procesos químicos sin consumirse. El poder de los anticuerpos para reconocer gran diversidad de sustancias no tiene igual.

Los dos tipos de proteínas ejercen sus efectos de forma análoga: uniéndose a otras moléculas. La superficie de las enzimas presenta una hendidura donde se anclan los reactivos químicos durante el proceso de su transformación. Los anticuerpos poseen un lugar específico que les capacita para unirse a otras moléculas pertenecientes a organismos extraños, invasores del cuerpo, y marcar a los intrusos para que los destruyan otros componentes del sistema inmunológico.

La gran diversidad de anticuerpos es un reflejo de la función defensiva del sistema inmunológico. Gracias a su facultad para generar unos 100 millones de anticuerpos diferentes, capaces, cada uno de ellos, de unirse a una sustancia extraña distinta, el sistema inmunológico se anticipa a la gran cantidad y variedad de posibles invasores. Por el contrario, las reacciones químicas vitales son estereotipadas e invariantes. La naturaleza se satisface con unos pocos miles de enzimas, capaz, cada una, de catalizar una o varias reacciones.

Sin ayuda de un catalizador, la mayoría de las reacciones bioquímicas transcurrirían con tanta parsimonia que resultarían inviables. Se desarrollen en el interior de los organismos, en ensayos de laboratorio o en procesos industriales, esas transformaciones dependen de modo decisivo del pequeño conjunto de enzimas existentes. Más aún, para las reacciones sin interés biológico no suele haber enzimas. El sistema inmunológico, sin embargo, puede crear un anticuerpo para casi cualquier sustancia; hoy puede aislarse cierta cantidad de anticuerpo "monoclonal" puro que reconozca una molécula diana. ¿Puede construirse, en virtud de la semejanza entre anticuerpos y enzimas, un anticuerpo capaz de catalizar reacciones químicas?

En nuestros laboratorios del Instituto de Investigación de la Clínica Scripps hemos estudiado los pormenores estructurales de la interacción entre un anticuerpo y su molécula diana. Recientemente, esos datos, unidos a nociones químicas de carácter más intuitivo, nos han sugerido diversas formas de aprovechar, para la catálisis, la energía de unión entre los anticuerpos y sus moléculas diana. Hemos fabricado ya los primeros anticuerpos catalíticos y creemos que nuestras investigaciones podrían fructificar en una variedad virtualmente ilimitada de especímenes de interés en biotecnología, medicina y bioquímica (estructura y función) de las proteínas.

Los anticuerpos ordinarios no catalizan las reacciones de los organismos, pero se advierte en ellos características que evicencian su potencial catalítico. Trabajando con Elizabeth D. Getzoff y John A. Tainer, de Scripps, y H. Mario Geysen, de los Laboratorios Commonwealth Serum, de Australia, encontramos que los anticuerpos inducían cambios estructurales en sus moléculas diana (tambien llamadas moléculas efectoras). En primer lugar indujimos la síntesis de anticuerpos contra una proteína inyectándosela a animales de experimentación. Determinamos luego a qué partes de la proteína original se unía más fácilmente el anticuerpo obtenido y cómo accedían a los segmentos antigénicos.

Como prototipo de proteína diana escogimos la miohemoeritrina (MHR), molécula trasportadora de oxígeno de ciertos gusanos marinos. Igual que otras proteínas, la MHR es una larga cadena de aminoácidos, plegada tridimensionalmente de forma específica. Se conocía la secuencia de aminoácidos de la MHR y su estructura tridimensional la determinaron, por cristalografía de rayos-X, Steven Sheriff, del Instituto Nacional estadounidense de Diabetes y Enfermedades Digestivas y Renales, Wayne A. Hendrickson, de la Universidad de Columbia, y Janet D. Smith, de la Universidad de Purdue. La información de la secuencia aminoacídica nos permitió sintetizar péptidos —breves secuencias de aminoácidos— que imitaban segmentos de la proteína. La información estructural nos sirvió para conocer el lugar que ocupaba cada péptido en la proteína.

Sometimos a ensayo la capacidad de cada péptido para interactuar con los anticuerpos anti-MHR y aceptamos el resultado como una medida de la unión del anticuerpo a la correspondiente zona de la proteína plegada. El mapa antigénico de MHR así obtenido demostró que cada porción de la proteína constituía la diana de unos pocos anticuerpos, pero que los sitios más activos eran aquellos donde la estructura de la proteína se mostraba flexible y sus aminoácidos formaban una superficie convexa, que presumiblemente encaje en la cavidad cóncava de unión de algún anticuerpo.

Abordamos luego las preferencias de unión de los anticuerpos. Para descubrir qué aminoácidos resultaban decisivos en la unión con el sitio activo, sintetizamos péptidos que remedaban el sitio antigénico de todos los aminoácidos salvo uno, que sustituíamos por otro. De nuevo sometimos a prueba la reactividad de los péptidos con los anticuerpos anti-MHR, tomando nota del efecto de cada sustitución. Si la susti-

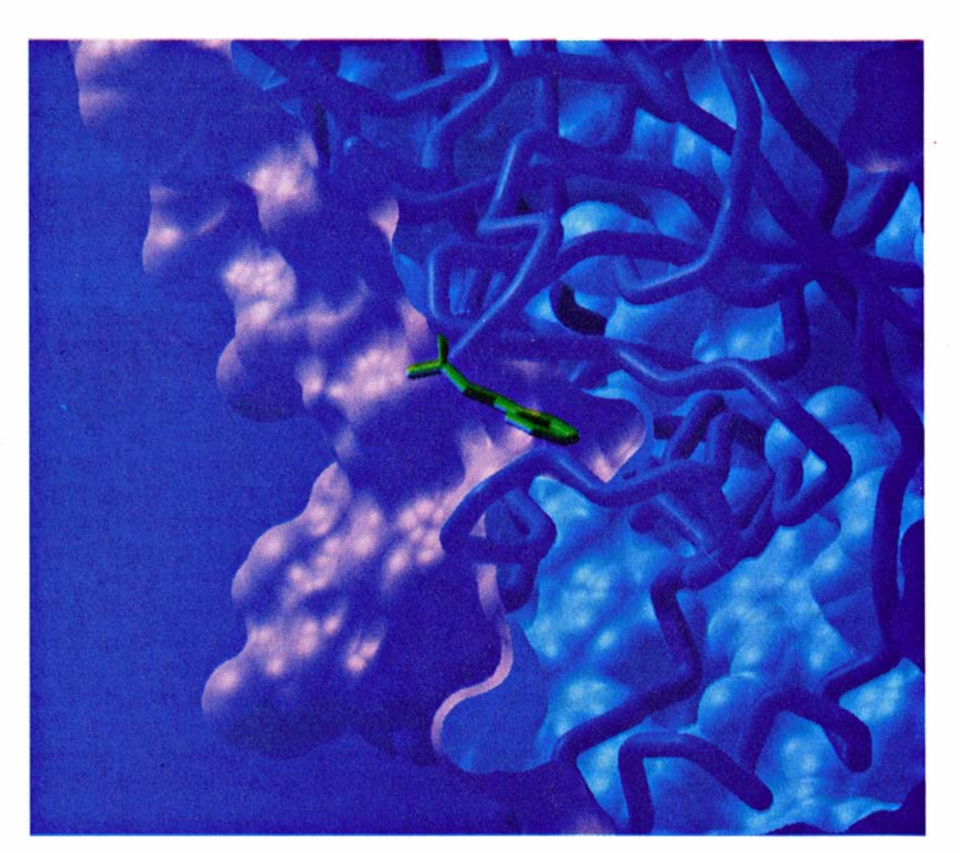
tución rebajaba notablemente la reactividad, el aminoácido original debía, entonces, hallarse en el enlace con el anticuerpo.

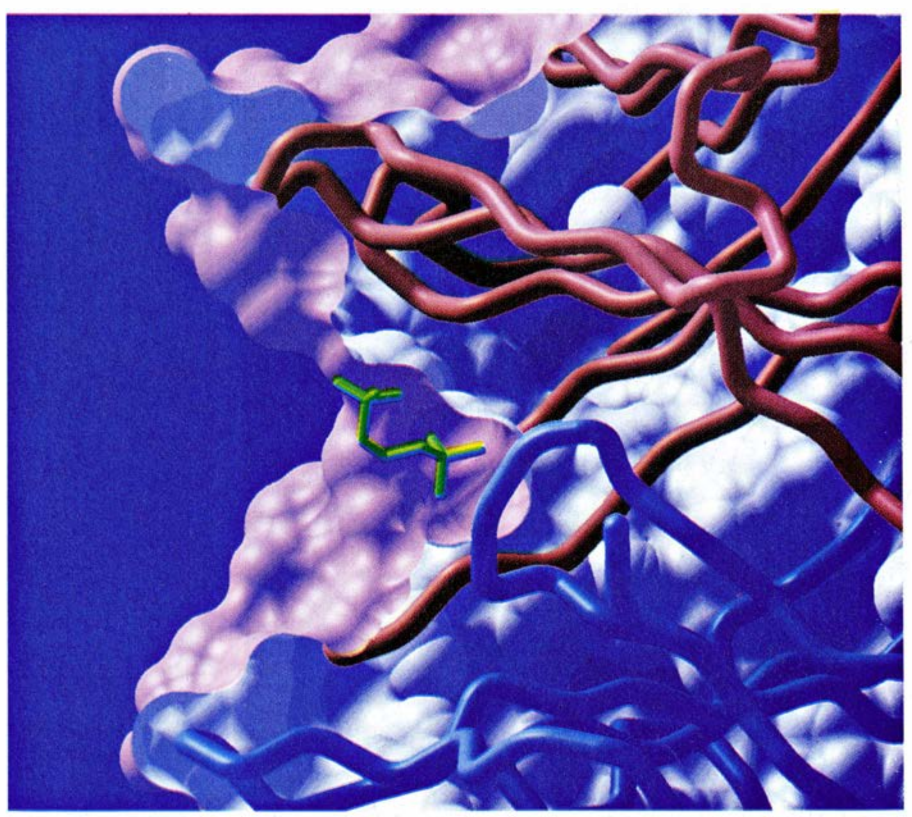
Para nuestra sorpresa, no todos los aminoácidos decisivos en la unión se encontraban en la superficie de la proteína, donde quedan expuestos directamente a los anticuerpos. Por ejemplo, en una secuencia de aminoácidos que representaba un sitio antigénico, los anticuerpos debían interactuar con los aminoácidos valina, tirosina y ácido glutámico para establecer una unión eficaz. Remplazando cualquiera de los tres se reducía bruscamente la reactividad del péptido. La estructura tridimensional de la MHR muestra que sólo la valina y el ácido glutámico asoman a la superficie de la proteína y que la tirosina (especialmente su voluminosa cadena lateral) permanece sepultada en el interior. La tirosina está tapada por ácido glutámico y lisina, éste último otro aminoácido cercano; ambos se mantienen unidos entre sí por un débil enlace electrostático. Se diría, por tanto, que el residuo de tirosina queda inaccesible a la interacción de un anticuerpo con la superficie de la MHR.

A medida que el anticuerpo se va engarzando, la tirosina tiene que ir emergiendo en la superficie proteica. Si la estructura en la cual la tirosina se encuentra sepultada corresponde a la de la configuración más estable de la proteína (es decir, la de energía mínima), entonces el anticuerpo enlazado mantendrá a la proteína en una forma energética bastante elevada. Al hacerlo, el anticuerpo gastará energía; cuya fuente estará en la intensidad del enlace del anticuerpo.

Las proteínas son moléculas dinámicas; sus enlaces se tensan, giran y vibran sin cesar. Puede que, fortuitamente, la cadena lateral de tirosina gire hasta quedar en el exterior de la superficie de la proteína, rompiendo el débil enlace que une el ácido glutámico y la lisina, y se estabilice enlazándose con el anticuerpo. Aunque también sería posible que las interacciones iniciales del anticuerpo con la proteína favorecieran la rotura del enlace. La cadena lateral, hasta entonces sepultada, podría entonces girar hacia el exterior e interactuar directamente con el anticuerpo.

En cualquier caso, los resultados nos dicen algo sumamente importante sobre los anticuerpos y su capacidad de enlace: ciertos anticuerpos podrían engarzarse sin ninguna traba a estados de





1. SE LLAMA CENTRO ACTIVO a la cavidad de unión que poseen enzimas (*arriba*) y anticuerpos (*abajo*). Ambos tipos de moléculas poseen la propiedad de unirse a otras sustancias; las enzimas catalizan un cambio químico en sus moléculas efectoras, en tanto que los anticuerpos se limitan a marcar sus blancos (moléculas características de organismos extraños) para que los reconozcan y los destruyan otros agentes del sistema inmunológico. Los autores han encontrado que puede dirigirse la energía de enlace de los anticuerpos de suerte tal que también ellos promuevan la transformación química de sus blancos. Las imágenes, generadas por ordenador, muestran la enzima quimotripsina y un anticuerpo cortados de forma que quede a la vista el esqueleto de la proteína (*azul arriba, rojo y azul abajo*); las realizó Arthur J. Olson, del Instituto de Investigación de la Clínica Scripps, con el programa gráfico MCS desarrollado por Michael L. Connolly, de Scripps. En ambas figuras se advierte que la cavidad de unión se encuentra ocupada por una micromolécula (*verde*).

alta energía de sus moléculas efectoras. Estabilizando esos estados, los anticuerpos superan los enlaces o fuerzas existentes en las formas de baja energía de las moléculas diana. En ese proceder, los anticuerpos se parecen a las enzimas, que alteran también los enlaces que encuentran en sus substratos, o moléculas diana. Cierto es que los enlaces covalentes que rompen las enzimas son mucho más fuertes que los que han de superar los anticuerpos. Pero, en definitiva, la fuerza de unión entre las enzimas y sus moléculas efectoras no es más intensa que la que liga a los anticuerpos con las suyas. Si la energía de enlace es la responsable de la capacidad catalítica de las enzimas, ¿podría aprovecharse la unión de los anticuerpos con sus moléculas diana para que no se limitara a marcarlas, sino que las transformara químicamente?

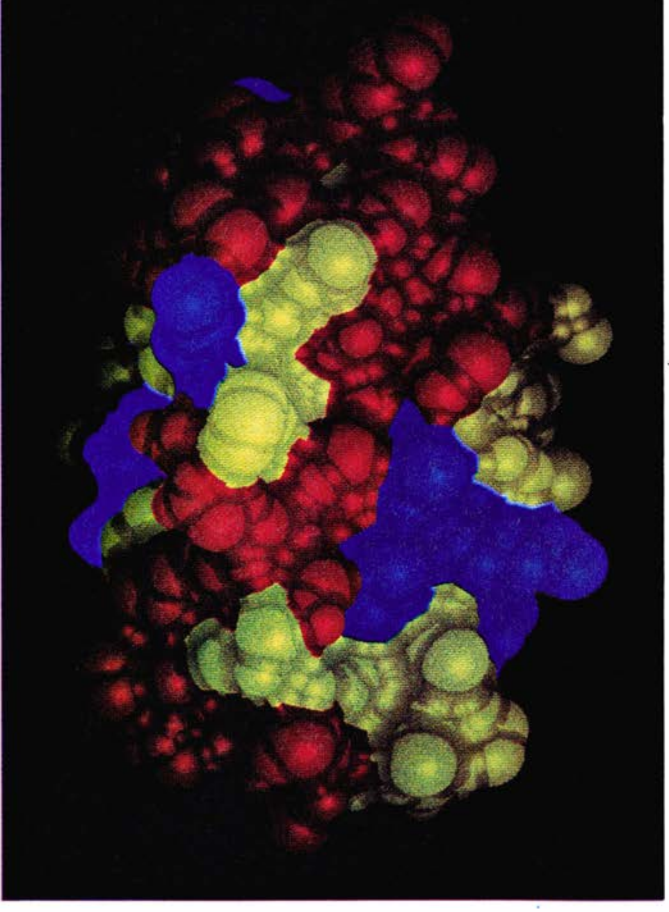
El modo de acción de las enzimas sugiere cómo lograrlo. Podemos explicar el efecto enzimático en términos de requerimientos energéticos de una reacción. Los procesos químicos pueden describirse como superficies energéticas, en las que las moléculas estables se encuentran en profundos pozos. Para que una molécula se transforme en otra, sus átomos han de viajar, a través de las superficies energéticas, de un pozo a otro. En primer lugar, los átomos deben ganar energía, para alcanzar una cresta, perdiéndola luego, al caer en un pozo estable: el producto. El punto más elevado de la ruta de reacción corresponde a un dinámico e inestable estado de transición, donde los enlaces se hallan en parte constituidos y en parte rotos. El estado de transición no es más que un efímero instante del viaje que lleva de reactivos a productos.

La diferencia de altura entre los puntos de la superficie energética que corresponden a las moléculas de partida y al estado de transición constituye la energía de activación de la reacción: la barrera energética que debe superarse para que la reacción discurra hasta su conclusión. Cuanto más alta sea la energía de activación, más lento será el proceso. Las enzimas aceleran las reacciones reduciendo su energía de activación: modifican la topografía de la superficie energética para que la ruta seguida por la reacción cruce una "colina" energética menor.

En 1946, Linus Pauling postuló un posible mecanismo de reducción de la barrera energética por parte de las enzimas: se unirían más intensamente al estado de transición que a los reactivos. Así se estabilizaría el estado de transición y se requeriría menos energía para formarlo; la reacción se acelera, a menudo en un factor de varios miles de millones. Las enzimas producen efectos catalíticos: los productos se liberan de ellas y permiten, de forma reiterada, la unión y transformación de moléculas de substrato.

En el esquema de Pauling, la diferencia fundamental entre la acción de las enzimas y los anticuerpos reside en

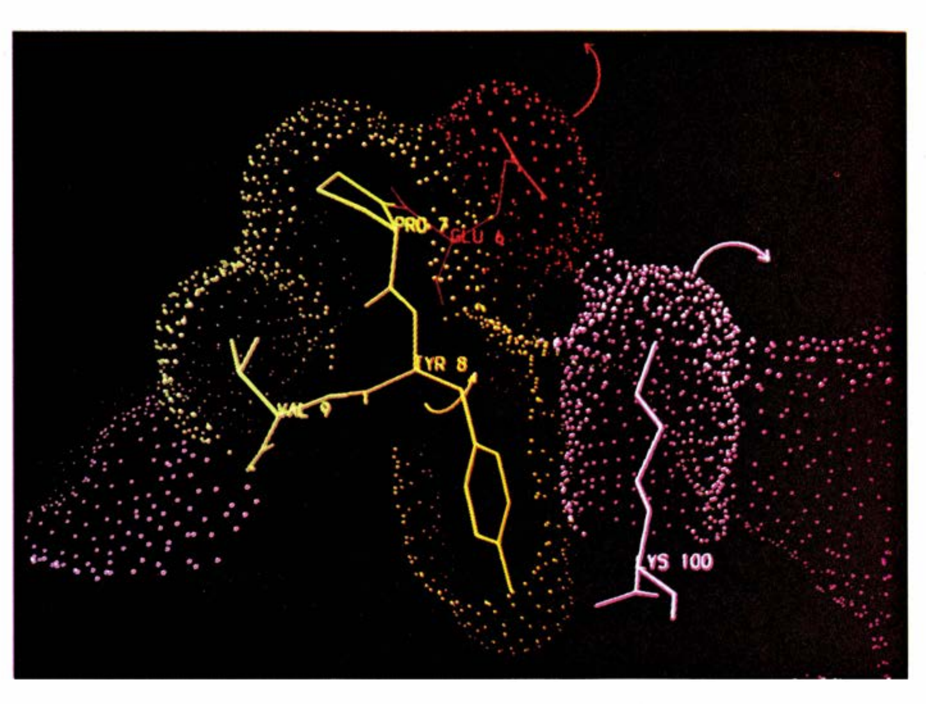




2. MAPA ANTIGENICO de la miohemoeritrina (MHR), proteína trasportadora de oxígeno de ciertos gusanos marinos; nos muestra las preferencias de enlace de los anticuerpos. Se sintetizaron moléculas peptídicas que remedaban breves segmentos de la cadena peptídica (*izquierda*). Se cartografió sobre la superficie proteica los diversos grados de reacción observados entre un anticuerpo, obtenido inoculando la proteína entera, y cada uno de los péptidos que la componen (*derecha*). Las regiones rojas son las más reactivas; las amarillas presentan reactividad intermedia, y, las azules, son las menos reactivas. Los anticuerpos optaban por los lugares donde la superficie es convexa y la proteína posee grupos químicos muy móviles. Ambas características asegurarían el adecuado ajuste entre la cavidad de unión y la superficie. Las imágenes, generadas por ordenador, son obra de Elizabeth D. Getzoff y John A. Tainer, de Scripps.

que aquéllas tienden a unirse a estados activados de alta energía y los anticuerpos lo hacen a estructuras de baja energía. Hace muchos años, William P. Jencks, de la Universidad de Brandeis, propuso que si pudiera desarrollarse un anticuerpo contra un estado de transición (una estructura de elevada energía), ejercería un efecto catalítico sobre la correspondiente reacción química.

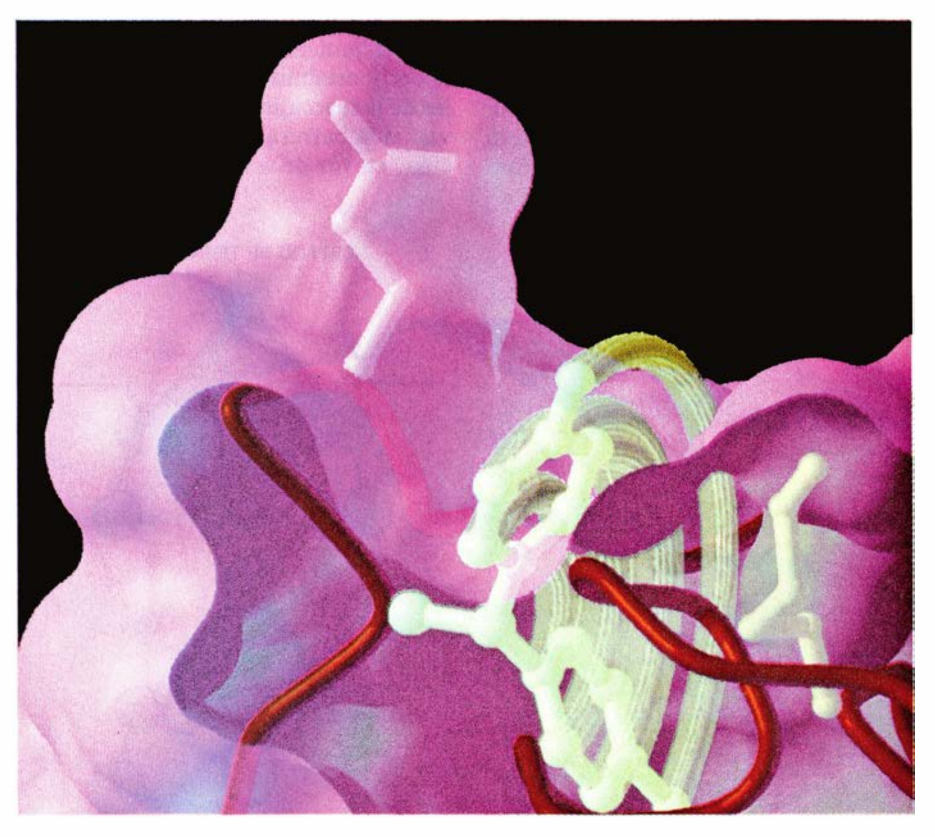
Sin embargo, el desarrollo de anticuerpos capaces de enlazarse con un estado de transición presenta numerosos problemas prácticos. Para obtener un anticuerpo es necesario un antígeno, que se inyecta en un animal de experimentación para que induzca una respuesta inmunológica. En realidad no se dispone del verdadero antígeno, pues el estado de transición es tan inestable que, a efectos prácticos, no existe. La solución del dilema llegó con otra propuesta de Pauling. Predijo que, para toda reacción mediada por una enzima, había una sustancia estable que remedaba la forma y la carga del estado de transición. Tal análogo se uniría estrechamente a la enzima e inhibiría su acción catalítica, pues ocuparía la cavidad de enlace e impediría su engarce con la sustancia pertinente. Durante los últimos 20 años se ha sintetizado gran cantidad de compuestos que se comportan según predijo Pauling.



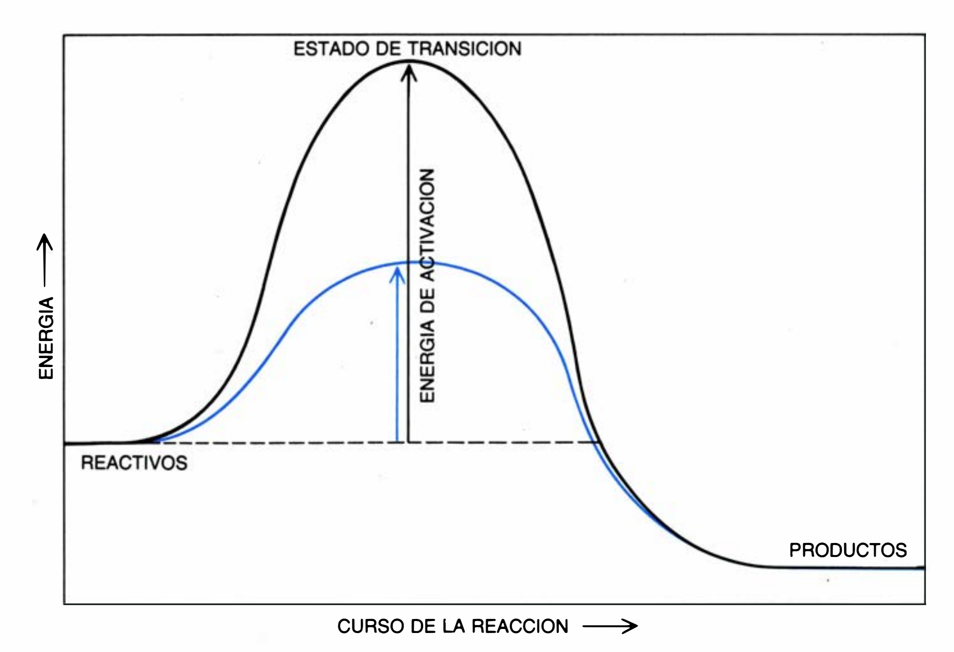
3. CAVIDAD DE UNION DEL ANTIGENO de la molécula de miohemoeritrina. Está formada por varios aminoácidos, tres de los cuales resultan esenciales para que los péptidos reaccionen con anticuerpos anti-MHR. Dos de los aminoácidos, la valina (*verde*) y el ácido glutámico (*rojo*), se encuentran en la superficie de la proteína; sin embargo, el tercero de ellos, la tirosina (*amarillo*), está escondido en el interior, bajo un débil enlace electrostático formado entre el ácido glutámico y un cuarto aminoácido, la lisina (*azul*). Para su interacción con la tirosina, el anticuerpo ha de favorecer una reorganización en virtud de la cual se rompa el enlace que mantiene unidos a los aminoácidos de la superficie y permita a la tirosina girar hacia el exterior (*flechas*). Al proceder de ese modo, el anticuerpo gasta energía. La imagen es obra de Getzoff y Tainer.

Los análogos del estado de transición podrían actuar, pues, como antígenos que indujeran anticuerpos capaces de reconocer el estado de transición real, estabilizarlo y quizás intervenir en el substrato, como un verdadero catalizador. Comenzamos nuestra exploración centrándonos en la hidrólisis de un éster, reacción en la cual una molécula de agua ataca un grupo químico conocido como éster y produce una molécula de ácido y otra de alcohol. El grupo éster consta de un átomo de carbono central enlazado a dos de oxígeno y a otro de carbono. El carbono central establece un doble enlace con uno de los oxígenos, con el cual forma el producto ácido; mientras que el otro oxígeno, destinado a constituir parte del producto alcohólico, se une a otro grupo orgánico. En la reacción hidrolítica se rompe el enlace entre el átomo de carbono central y el oxígeno del grupo alcohol y se forma un nuevo enlace entre ese carbono y un átomo de oxígeno de una molécula de agua.

Los cuatro átomos que componen el grupo éster portan una carga débil y se encuentran situados en un mismo plano. Sin embargo, cuando la molécula



4. CADENA LATERAL DE TIROSINA, que gira alrededor del esqueleto proteico (*rojo*) cuando un anticuerpo se une a la cavidad de unión del antígeno, según muestra la figura 3. La reorganización puede producirse por un movimiento térmico aleatorio, estabilizándose sin más por el enlace con el anticuerpo, o bien porque el anticuerpo reorganice activamente la superficie de la proteína y, de ese modo, induzca el cambio necesario en la configuración del aminoácido, que constituiría entonces un estado de alta energía. La imagen, obtenida también con el programa MCS, de Connolly, es obra de Michael E. Pique, Getzoff y Tainer.

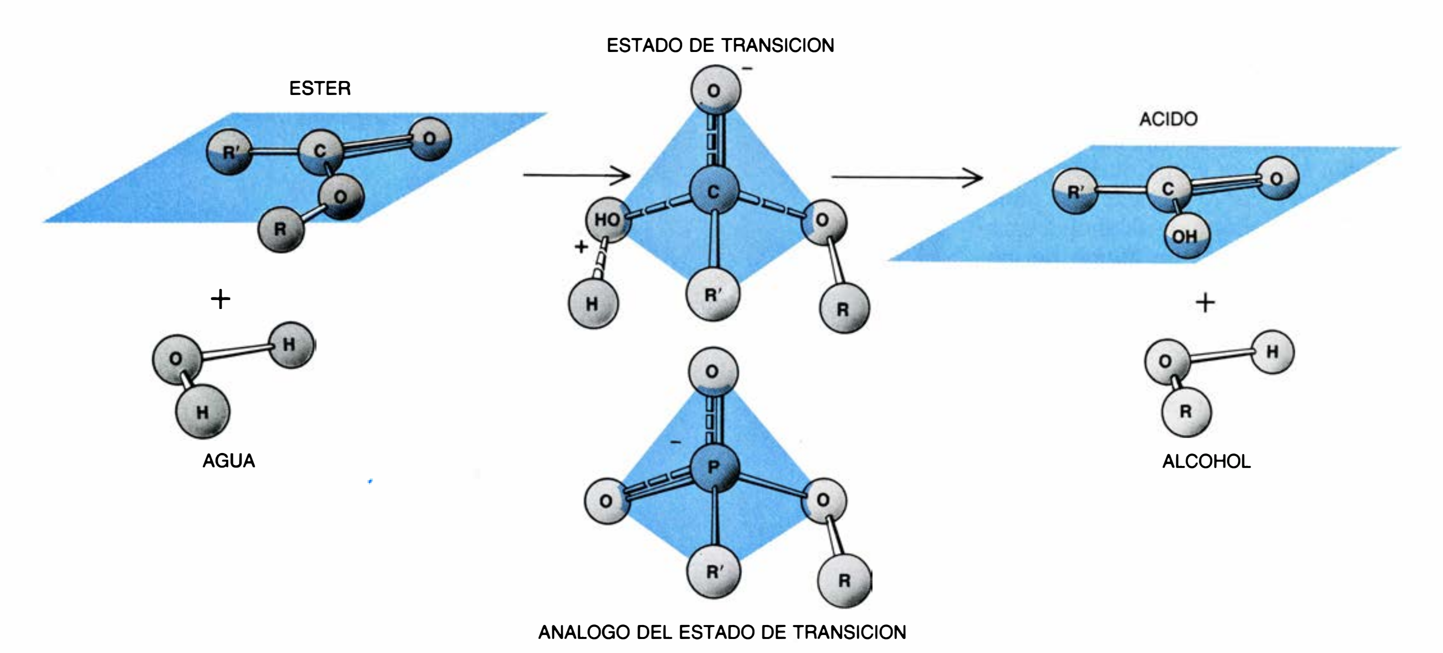


5. PERFIL ENERGETICO de una hipotética reacción. Se representan las demandas energéticas que exige la transformación de reactivos en productos. Saliendo del punto de partida, la curva asciende cierta altura, denominada energía de activación. El punto correspondiente al pico energético es el estado de transición de la reacción, efímero e inestable conjunto de átomos. Las enzimas catalizan una reacción uniéndose, en parte, al estado de transición y estabilizándolo. Se reduce con ello (*curva en azul*) la energía de activación de la reacción no catalizada (*curva negra*), acelerándose el proceso en un factor de varios miles de millones.

de agua interactúa con el éster, la reacción atraviesa un estado de transición en el cual el átomo de carbono central queda rodeado por cuatro átomos en disposición tetraédrica: tres oxígenos, algunos de ellos dotados de carga eléctrica, y un carbono. En el estado de transición, los enlaces no sólo se reorientan, sino que también se alargan hasta quizás el 120 por ciento de su longitud normal. Las características especiales del estado de transición indican que el éster no puede, por sí mismo, servir de antígeno que induzca anticuerpos catalíticos. El éster sólo produciría anticuerpos capaces de reconocer y estabilizar los reactivos iniciales de la reacción. Esos anticuerpos elevarían la barrera energética de la reacción, en vez de rebajarla.

Lo que interesa es un análogo del estado de transición. La sustitución, en la configuración tetraédrica de ese estado, del átomo de carbono central por un átomo de fósforo conduce a la formación del compuesto estable éster fosfórico. La distribución de carga de los átomos de oxígeno de esta molécula semeja la del estado de transición. Además, los enlaces entre fósforo y oxígeno son un 20 por ciento más largos que los enlaces carbono-oxígeno normales, lo cual permite al análogo simular mejor los prolongados enlaces del estado de transición.

Sintetizamos ese análogo, lo unimos a una proteína transportadora e inmunizamos ratones con el grupo conjugado. Seguidamente obtuvimos de los ratones células de bazo secretoras de anticuerpos. Fusionamos las células de bazo con células tumorales y generamos clones de células, idénticas, secretoras de anticuerpos. Por regla general, un mismo antígeno induce la producción de gran cantidad de anticuerpos diferentes, que se unen a diversas partes de la molécula, pero cada célula secretora de anticuerpos (y los clones que derivan de ella) elabora un solo tipo de anticuerpo. Para identificar las células secretoras del anticuerpo correspondiente al análogo del estado de transición y no, por ejemplo, a alguna porción de la proteína trasportadora, sometimos todos los anticuerpos monoclonales a una prueba que medía



6. HIDROLISIS DE UN ESTER, que atraviesa un estado de transición inestable cuyas forma y carga puede simular otra molécula estable. El grupo éster y el producto ácido, que hereda el átomo de carbono central del primero, presentan una geometría planar no cargada. (*R* y *R'* representan grupos químicos que no intervienen en la reacción.) El estado de transición es tetraédrico y polarizado: en un extremo se concentra una carga parcial negativa. Un análogo estable, con un átomo de fósforo en lugar del átomo de carbono central del estado de transición, simula su geometría y aproxima su distribución de carga.

su capacidad de enlace con el análogo del estado de transición.

Una vez identificados los anticuerpos monoclonales específicos para el citado análogo, estudiamos su capacidad para catalizar la hidrólisis del correspondiente éster. Algunos anticuerpos no ejercían efecto alguno; quizá fueran específicos de algún rasgo de la molécula sin relación directa con el estado de transición. Sin embargo, nos alegró descubrir que otros anticuerpos se comportaban como catalizadores y aceleraban la hidrólisis del éster en un factor de aproximadamente 1000. Como ya esperábamos, el éster fosfónico que había inducido los anticuerpos inhibió la acción catalítica, presumiblemente bloqueando el enlace del substrato. Al igual que la capacidad de reconocimiento que presentan los anticuerpos normales, la actividad catalítica de esas moléculas resultó ser altamente específica: catalizaron sólo la hidrólisis de ésteres cuyo estado de transición manifestaba una estructura muy semejante al antígeno inmunizador.

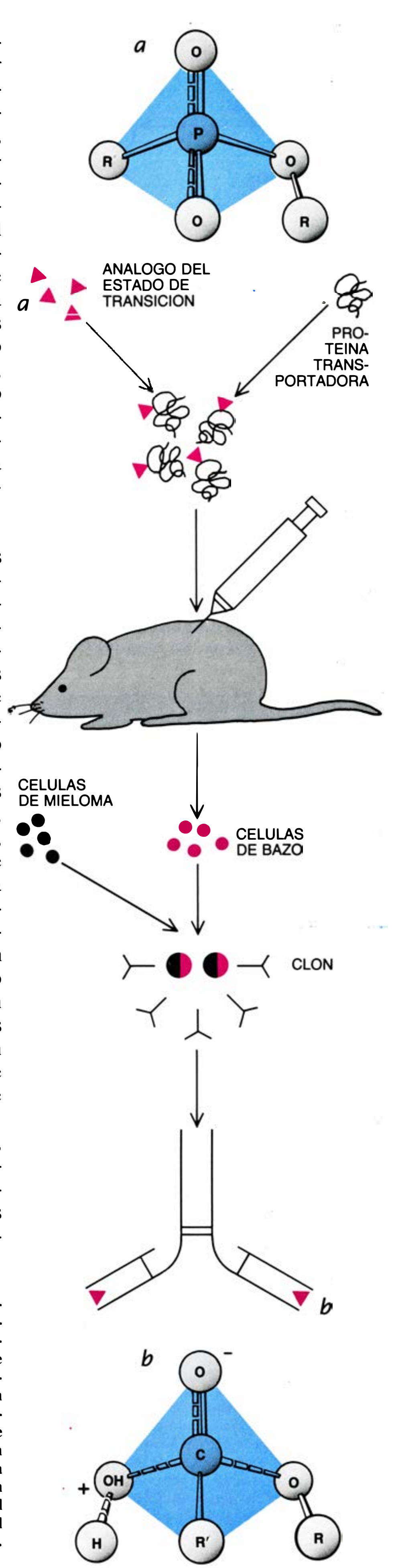
Coincidiendo en el tiempo con nuestros experimentos, Scott J. Pollack, Jeffrey W. Jacobs y Peter G. Schultz, de la Universidad de California en Berkeley, realizaron una prueba algo distinta, basada, sin embargo, en el mismo principio. Partieron de un anticuerpo específico para la fosforilcolina, que porta un átomo de fósforo unido tetraédricamente a cuatro oxígenos. La estructura tridimensional del anticuerpo que habían obtenido David R. Davies y sus colaboradores, del Instituto Nacional estadounidense de Artritis, Metabolismo y Enfermedades Digestivas, sugería que en su cavidad de enlace se acomodaba limpiamente el grupo fosfato tetraédrico.

El equipo de Berkeley dedujo que el anticuerpo podría estabilizar el estado de transición de una reacción de hidrólisis y, por consiguiente, catalizarla. Decidieron, por tanto, diseñar un reactivo del que se formara un estado de transición cuya carga y configuración semejaran las de la fosforilcolina. Pasando por un estado de transición tetraédrico con cuatro átomos de oxígeno, los reactivos debían contener un grupo carbonato (un átomo de carbono unido a tres de oxigeno). Tras sintetizar el carbonato apropiado, comprobaron que su anticuerpo multiplicaba por varios centenares la velocidad de reacción de la hidrólisis.

El resultado del grupo de Berkeley apoyaba la hipótesis según la cual la estabilización del estado de transición constituye la clave de la catálisis mediada por anticuerpos. Para demostrar el principio general (del sistema inmunológico puede obtenerse un catalizador de especificidad predeterminada), hay que partir, como hizo nuestro grupo, de un antígeno. Nuestro experimento seguía un guión general de desarrollo de anticuerpos catalíticos. Del estudio de mecanismos químicos se infiere la morfología y la distribución de carga del estado de transición de una reacción. Siguiendo razonamientos químicos elementales se va diseñando el estado de transición estable ficticio, que servirá para obtener un anticuerpo con una cavidad de unión complementaria. El desarrollo de anticuerpos catalíticos constituye, en gran parte, una tarea de diseño y preparación del antígeno adecuado.

Los anticuerpos catalíticos obtenidos tras el cuidadoso diseño de antígenos no sólo poseen selectividad y eficacia catalíticas, sino también una tercera propiedad característica de las enzimas: su capacidad para distinguir las diferentes formas estereoquímicas de una molécula. En particular, las moléculas en las que un átomo de carbono está unido a cuatro grupos químicos diferentes pueden presentar dos formas que, aunque químicamente idénticas, son imágenes especulares mutuas; guardan entre sí la misma relación que la existente entre la mano derecha y la izquierda. Los dos enantiómeros, o formas especulares, de un compuesto quiral de esas características reaccionan idénticamente con otras sustancias no quirales. Sin embargo, en una reacción entre dos compuestos quirales, ciertos enantiómeros específicos interactúan entre sí de modo preferente, igual que existe una concordancia perfecta entre cada mano y su respectivo guante.

Todos los aminoácidos, salvo uno, son quirales; por tanto, lo serán también las proteínas que forman. La mayoría de los seres vivos elaboran sus proteínas a partir de un solo enantió-

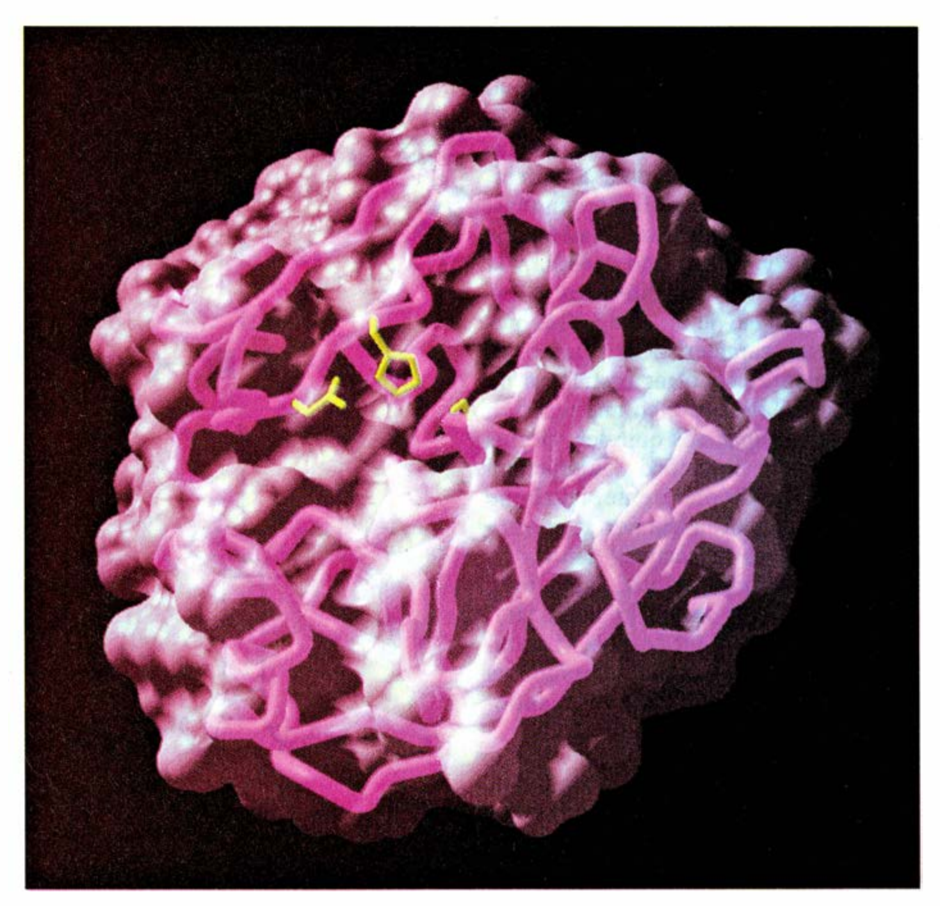


7. ANTICUERPO CATALITICO para una reacción (hidrólisis de un éster) obtenido uniendo un análogo del estado de transición (*a*) a una proteína transportadora e inyectando el conjunto en un animal de experimentación. Se toman células de bazo secretoras de anticuerpos y se fusionan con células de un mieloma. El híbrido resultante, de anticuerpo y células secretoras, se dividide indefinidamente, lo que posibilita la obtención de clones celulares. Cada clon híbrido segrega un anticuerpo monoclonal con una cavidad de unión única. Se selecciona entonces un clon que elabore un anticuerpo específico para el análogo. El anticuerpo podría, también, unirse al estado de transición (*b*) y catalizar la reacción.

REACTIVO — ESTADO DE TRANSICION — LACTONA

ANALOGO DEL ESTADO DE TRANSICION

8. **ENSAYO DE ESTEREOESPECIFICIDAD de los anticuerpos catalíticos. Se trata de una reacción química en la cual una molécula dotada de una cadena abierta que porta átomos de oxígeno y carbono se transforma en un compuesto cíclico denominado lactona. Tanto los reactivos de partida como el estado de transición y el producto contienen un átomo de carbono quiral (*color*), es decir, un átomo de carbono unido a cuatro grupos químicos que pueden tener dos configuraciones distintas, una imagen especular de la otra (*arriba y centro*). Los autores sintetizaron un análogo del estado de transición y obtuvieron un anticuerpo capaz de unirse a una sola forma del análogo. El anticuerpo catalizó la constitución de una sola forma de la lactona, que resultó ser estereoespecífica: distinguía las morfologías quirales del estado de transición.**



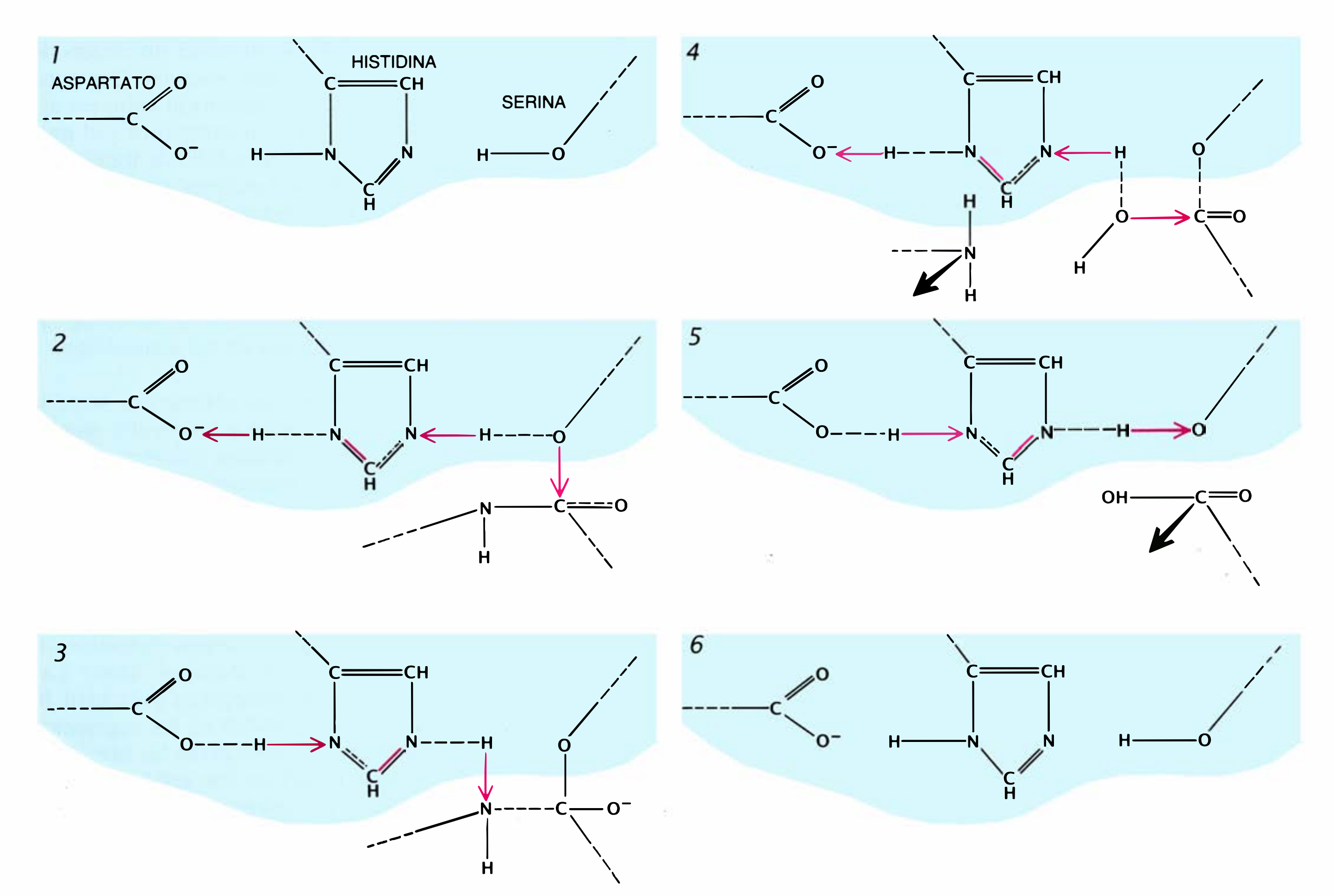
9. **TRIPSINA, enzima digestiva catalizadora de la hidrólisis de proteínas. Acelera la reacción estabilizando el estado de transición cuando se produce la rotura de un enlace amida (carbono-nitrógeno) e interactuando con el grupo amida por medio de las cadenas laterales en su cavidad de unión. Tres aminoácidos (*verde*) forman la "tríada catalítica" de tripsina y otras enzimas emparentadas. Las cadenas laterales reaccionan con el enlace proteico y forman estados de transición de menor energía que el de la reacción hidrolítica no catalizada (*véase la figura 10*). La imagen, generada por ordenador y que muestra la superficie y esqueleto de la proteína, fue realizada por Olson mediante el programa MCS de Connolly y basándose en los datos cristalográficos de rayos X obtenidos por Robert Huber y sus colaboradores, de la Universidad de Munich.**

mero de cada aminoácido, de ahí que las enzimas presenten una sola forma quiral. A menudo, en una reacción cuyo reactivo inicial o producto final sea quiral, la enzima correspondiente sólo cataliza el proceso para uno de los enantiómeros. Es de esperar, pues, que los anticuerpos catalíticos —que son proteínas quirales— muestren esa misma estereoespecificidad.

En colaboración con Andrew Napper y Stephen J. Benkovic, de la Universidad estatal de Pennsylvania, analizamos la estereoespecificidad estudiando una reacción en la cual substrato, estado de transición y productos eran, todos, quirales. La reacción formaba un enlace entre un oxígeno situado en un extremo de una cadena molecular y un carbono del otro extremo, transformándose el reactivo de partida en una molécula cíclica: la lactona. Un átomo de carbono localizado a mitad de la cadena estaba enlazado con cuatro grupos diferentes y, por consiguiente, era quiral; definía dos enantiómeros del substrato, del estado de transición y de los productos. Un catalizador estereoespecífico se enlazaría preferentemente con uno de los enantiómeros del estado de transición y sólo transformaría una de las formas del substrato en una de las formas del producto.

La reacción atravesaba un estado de transición tetraédrico semejante al del estado de transición de la hidrólisis del éster. Igual que antes, creamos un análogo del estado de transición remplazando el átomo de carbono tetraédrico por otro de fósforo. Inyectamos el análogo en los animales de experimentación y obtuvimos anticuerpos monoclonales. Aunque el análogo era una mezcla de formas quirales, cada anticuerpo monoclonal sólo reconocía uno de los enantiómeros. Uno de los anticuerpos mostraba propiedades catalíticas. Tal y como esperábamos, la reacción catalítica consumía sólo la mitad de los reactivos de partida, donde se encontraban mezclados los enantiómeros de la molécula progenitora, y producía una forma quiral de la lactona final. La acción del anticuerpo fue, pues, específica, seguramente debido a que la cavidad de unión se había generado para reconocer una única forma del estado de transición de la reacción.

Probablemente la estereoespecificidad sea una propiedad general de los anticuerpos catalíticos, capaz de hacerles desempeñar un importante papel en infinidad de procesos industriales, incluida la síntesis de sustancias terapéu-



10. TRIADA CATALITICA de aspartato, histidina y serina (*1*) que actúa concertadamente para romper el enlace amida de una proteína del centro activo de la tripsina. El átomo de oxígeno de la serina queda libre para atacar el átomo de carbono cuando la histidina cede un protón al oxígeno, cargado negativamente, del aspartato y la serina transfiere otro protón a la histidina (*2*). Regresa entonces el primer protón y el segundo ataca al átomo de nitrógeno (*3*). Al liberarse una parte de la proteína, una molécula de agua ocupa su lugar y se repite la permuta de protones, formándose un grupo hidroxilo (OH) que ataca el enlace existente entre el carbono y el oxígeno de la serina (*4*). Se rompe el enlace, se libera el resto de la proteína (*5*) y la tríada recupera su posición estable (*6*).

ticas. Ciertos fármacos contienen uno o más centros quirales y dan lugar a diversas formas estereoquímicas de la molécula. Por regla general, con la molécula del receptor de la célula efectora sólo reacciona correctamente una de aquellas formas. La otra puede resultar inútil o, incluso perjudicial si, en caso de reaccionar, lo hace con receptores no pertinentes.

Las mismas consideraciones que nos permitieron obtener anticuerpos catalíticos en reacciones de moléculas sencillas, como los ésteres, señalan el camino a seguir para la creación de anticuerpos capaces de escindir proteínas y ácidos nucleicos: las moléculas fundamentales de la vida y, por tanto, reactivos principales en biología molecular y biotecnología. Los enlaces estructurales de las proteínas son de tipo amida: unen un átomo de carbono de un aminoácido con otro de nitrógeno del aminoácido adyacente en la cadena proteica. En el estado de transición de la hidrólisis de amidas, el carbono situado en un extremo del enlace adopta una geometría tetraédrica muy similar a la del estado de transición de la hidrólisis del éster (configuración fácilmente simulable por un análogo fosfórico). Un anticuerpo obtenido con un análogo de ese tipo, que podría portar también unos cuantos aminoácidos alrededor del enlace diana de la cadena proteica, podría poseer la capacidad de escindir proteínas. Su acción resultaría altamente específica: hidrolizaría el enlace situado en el interior de la secuencia aminoacídica simulada por el análogo.

Sin embargo, los enlaces amida se caracterizan por su extraordinaria estabilidad; no se han creado todavía los anticuerpos capaces de acelerar su hidrólisis. Una de las previsibles dificultades que habrán de presentarse es la relativa al enlace con el estado de transición, que no bastará para acelerar reacciones de energía de activación muy elevada. La cavidad de unión de la proteína catalítica (sea ésta un anticuerpo o una enzima) ha de poder intervenir directamente en la reacción, alterando su mecanismo de forma que pueda atravesarse la superficie energética desde el pozo del substrato hasta el del producto por un camino alternativo de menor energía. Es decir, los aminoácidos situados en la cavidad de unión deben intervenir, de manera directa, en la reacción.

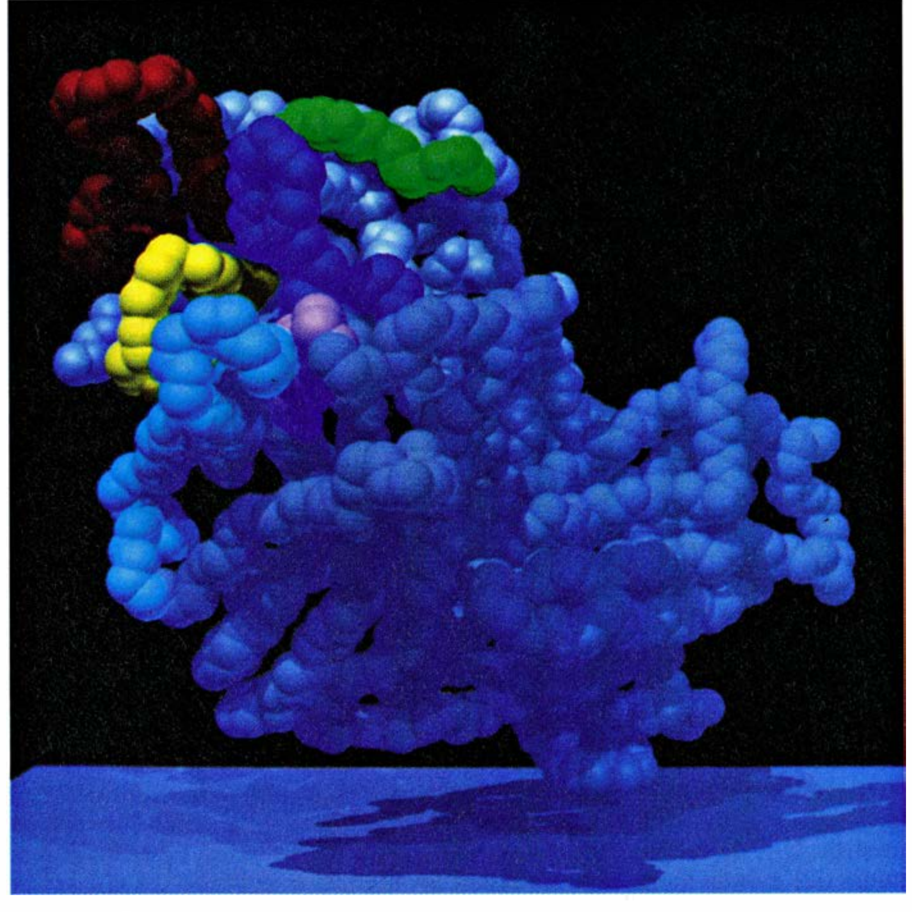
La acción de los aminoácidos (o, de forma más precisa, sus cadenas laterales) remeda la del efecto catalítico de compuestos simples o iones en solución. A diferencia de las enzimas, esas especies son demasiado pequeñas para que el substrato quepa en la cavidad de unión, pero pueden actuar como catalizadores formando enlaces químicos transitorios con los átomos reaccionantes. Por ejemplo, una base simple puede acelerar la hidrólisis de un éster extrayendo un ion hidrógeno de una molécula de agua. El ion hidróxido obtenido reacciona con el grupo éster mucho más fácilmente que la propia molécula de agua. Y viceversa; una pequeña molécula con afinidad hacia los

átomos de carbono puede sustituir a la molécula de agua en la rotura del enlace carbono-oxígeno, liberando el alcohol y formando un complejo, o intermediario, con los restos del éster. Una molécula de agua desplaza luego el catalizador y libera el producto ácido de la hidrólisis.

Las cadenas laterales de los aminoácidos existentes en una cavidad de unión enzimática poseen una ventaja sobre los grupos catalíticos en solución libre: no dependen del azar para unirse con la molécula efectora. En muchas enzimas, interactúan simultáneamente con el substrato tres o más grupos. Si esos grupos se presentaran convertidos en pequeñas moléculas en solución, su yuxtaposición resultaría bastante improbable, al margen incluso de la obligación de adoptar cierta orientación mutua. Alineando grupos activos entre sí y con el enlace del substrato, la cavidad de unión de las enzimas posibilita un mecanismo catalítico que de otra forma habría que descartar.

Se ha comprobado, por ejemplo, que, para que actúen la tripsina y otras enzimas proteolíticas del tracto intestinal, resulta decisivo que la "tríada catalítica" formada por los aminoácidos aspartato, histidina y serina adopte una disposición determinada en la cavidad de unión. Cuando las enzimas atacan un enlace amida, los tres aminoácidos actúan al unísono, destruyendo el enlace paso a paso. En primer lugar, el átomo de carbono de un extremo terminal del enlace amida se une a la serina y se libera la parte final de la proteína que porta el átomo de nitrógeno; a continuación reacciona una molécula de agua con el complejo serina-substrato para liberar el resto de la proteína y devuelve a la enzima a su estado relajado [*véase la figura 10*].

Así pues, gracias a la participación directa de las cadenas laterales de la cavidad de unión, la enzima fracciona, en un conjunto de pasos intermedios simples y con estados de transición de menor energía, una reacción que, de otro modo, debería atravesar un estado de transición de alta energía. Conviene destacar aquí la distinción entre ese aspecto de la acción enzimática y el proceso de unión del estado de transición, si bien ambas funciones guardan relación. La cavidad de unión de la enzima puede estabilizar los estados de transición subsidiarios, disminuyendo el coste energético de su formación y tomando parte directa en él a través de las cadenas laterales de los aminoácidos.



11. "BUCLES HIPERVARIABLES" (*color*) de proteína configuran la cavidad de unión de los anticuerpos. La figura muestra uno de los brazos de una molécula de anticuerpo en forma de Y; dos de las cadenas polipeptídicas de los anticuerpos aportan tres bucles hipervariables cada una a la formación de la cavidad. La composición química de esa cavidad de unión posibilitaría la participación directa de los aminoácidos en el estado de transición cuando el anticuerpo catalizara una reacción. La composición de la cavidad presenta variaciones entre los varios millones de anticuerpos que se elaboran, por lo que existirían varios anticuerpos catalíticos para una misma reacción, cada uno de los cuales aportaría un mecanismo catalítico propio.

También en los anticuerpos la cavidad de unión se encuentra alineada con determinadas orientaciones de las cadenas laterales, algunas de las cuales desempeñan un importante papel en la catálisis. ¿Puede el sistema inmunológico intervenir en la producción de un anticuerpo cuya cavidad de unión, además de estabilizar el estado de transición, intervenga directamente en la reacción y altere su curso? Las moléculas de anticuerpo presentan la máxima variabilidad en los segmentos proteicos que configuran las cavidades de unión; incluso los anticuerpos capaces de reconocer el mismo antígeno pueden presentar cavidades formadas por distintos juegos de aminoácidos. A través del diseño meticuloso de antígenos podría obtenerse un anticuerpo dotado de aminoácidos específicos, capaz de participar en una determinada reacción. Podríamos, por ejemplo, tratar de diseñar un simulador del estado de transición que, en vez de estático, fuera dinámico: un compuesto que, imitando el estado de transición, reaccionara químicamente con la cavidad de unión de un anticuerpo apropiado.

En efecto, la asombrosa variabilidad de los sitios de acción de los anticuerpos brinda la posibilidad de desarrollar anticuerpos capaces de unir gran cantidad de cadenas laterales catalíticas de una misma reacción. Centenares o miles de anticuerpos contra el mismo estado de transición del análogo podrían, cada uno, catalizar la reacción mediante mecanismos ligeramente diferentes, a tenor del conjunto de cadenas laterales de la cavidad de unión. Ya vimos algunas pruebas de la diversidad de mecanismos de los anticuerpos catalíticos en la hidrólisis de un éster: mientras que el primer anticuerpo aceleraba la reacción en un factor de 1000, otros anticuerpos del mismo análogo del estado de transición la aceleraban en un factor de hasta siete millones.

La diversidad de mecanismos catalíticos podría avalar la prosecución de los estudios sobre la catálisis proteica.

¿Qué características específicas explican el rendimiento eficaz de las enzimas naturales? ¿Qué características mínimas requiere su actividad? ¿Cuál es la estructura menos eficiente de las enzimas y, por tanto, evolutivamente más primitiva? Estas preguntas han instado investigaciones minuciosas de las enzimas existentes. El estudio de los efectos catalíticos de los anticuerpos cuyas cavidades de unión muestran sutiles divergencias constituirá un modo excelente, a la par que nuevo, de responder tales cuestiones.

Los anticuerpos catalíticos, ideados por nuestro equipo y por otros autores, transforman compuestos más o menos sencillos. En gran medida, el potencial de esos nuevos catalizadores proteicos en el campo de la biotecnología y la medicina depende del desarrollo de anticuerpos capaces de actuar sobre proteínas o ácidos nucleicos. Las proteasas existentes son pocas en número y de pobre especificidad en su acción: rompen el enlace diana sin tener muy en cuenta el entorno químico. Los anticuerpos catalíticos podrían hidrolizar enlaces amida resistentes a las proteasas conocidas y podrían ser mucho más sensibles a los aminoácidos específicos que rodean el enlace diana.

Catalizadores de esa índole hallarían aplicación en medicina; con las vacunas, por ejemplo. Las actuales, para inducir la elaboración de anticuerpos protectores simulan un agente patógeno, verbigracia, un virus. La futura vacuna antivírica simularía el estado de transición de la hidrólisis de una proteína vírica. Induciría así anticuerpos catalíticos que protegerían el receptor destruyendo el virus invasor y dejando a salvo las proteínas del hospedador. Por los mismos principios, podría estimularse el sistema inmunológico de un paciente afecto de una enfermedad coronaria para que sintetizara anticuerpos capaces de disolver las proteínas de los coágulos de sangre, anticipándose así a los ataques de corazón.

Los anticuerpos catalíticos ampliarán la capacidad defensiva innata del sistema inmunológico. Contribuirán al desarrollo de la biotecnología y la investigación básica en química y biología molecular, disciplinas que deben beneficiarse directamente de cualquier mejora de la caja de herramientas molecular. La posibilidad de explorar enteramente el potencial de las cavidades de unión proteicas para favorecer reacciones químicas habrá de ofrecer otros beneficios que no podemos aventurar.

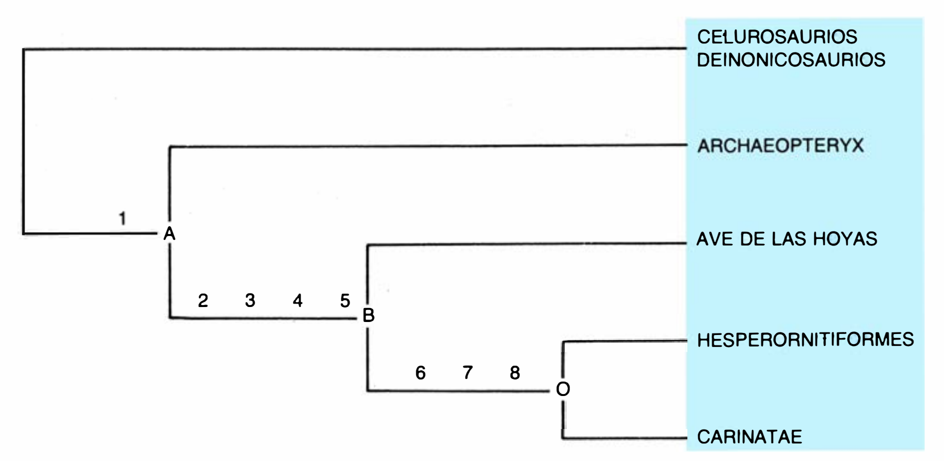
Ciencia y sociedad

Filogenia de las primeras aves

La primitiva historia evolutiva de las aves constituye una de las cuestiones más debatidas en paleontología. La controversia se explica por la escasa representatividad del registro fósil de estos vertebrados, en particular de las formas más antiguas. En distintas ocasiones se ha apelado a supuestos representantes triásicos de la clase Aves. Por el momento, no parece que ninguna de las pruebas triásicas avianas que se han aducido convenza por sí sola. Antes bien, la mayoría de especialistas coinciden en admitir que *Archaeopteryx*, del Jurásico superior de Baviera, representa la primera ave conocida. Las afinidades reptilianas de este género fueron ya puestas de manifiesto por T. H. Huxley en 1868. El grupo de Arcosaurios con parentesco más cercano a las aves es todavía objeto de debate, pero un número elevado de expertos admite que se trata de dinosaurios terópodos, en concreto, de Celurosaurios y Deinonicosaurios.

A partir de *Archaeopteryx*, el registro fósil de las aves durante el Cretácico inferior (un lapso de tiempo que va desde hace unos 140 a 100 millones de años) es escaso, con hallazgos ocasionales de restos aislados, que difícilmente proporcionan una información de interés. Se acaba de publicar el hallazgo de un nuevo fósil que puede aportar nuevos datos para el conocimiento de la historia evolutiva de las aves durante ese lapso de tiempo que se caracteriza por la pobreza de su registro. El hallazgo se llevó a cabo en una formación de calizas continentales de Cuenca (yacimiento de Las Hoyas), cuya edad absoluta se cifra entre 130–120 millones de años. La nueva ave fósil española tiene un tamaño reducido (fémur de 15 milímetros de longitud), equivalente a las dimensiones de un gorrión. Carece de cráneo y primeras vértebras cervicales, así como de carpo y mano, pero el resto del esqueleto postcraneal se conserva casi entero.

La nueva forma de ave del Cretácico inferior español se dintingue por una combinación de caracteres primitivos y derivados. En general, la cintura escapular y el miembro anterior son típicamente avianos. Por el contrario, la cintura pelviana y el miembro posterior son primitivos, semejantes a los de *Archaeopteryx* y los Celurosaurios y Deinonicosaurios. Las relaciones filogenéticas de esta nueva forma española se resume en el cladograma adjunto. Para el establecimiento de la polaridad evolutiva de caracteres, se han escogido, como grupo externo ("out–group"), las formas de dinosaurios terópodos antes citadas. La caracterización del nodo A (Aves) es problemática, pero la aparición de plumas (carácter número 1) es una sinapomorfía generalmente admitida, que define el carácter monofilético de las aves.



1. Filogenia de las primeras aves. Se supone que los Celurosaurios y Deinonicosaurios constituían un grupo hermano de las aves. Nodo A: Aves. Nodo B: Ave de Las Hoyas + Ornithurae. Nodo O: Ornithurae (Hesperornitiformes + Carinatae). Caracteres: 1) Aparición de plumas. 2) Vértebras caudales libres + pigostilo. 3) Aparato gastral reducido o ausente. 4) Coracoides expandido distalmente, en forma de "T". 5) Fúrcula con bajo ángulo interclavicular y apófisis medial (hipocleidium) desarrollada. 6) Fusión de los elementos de la cintura pelviana y aparición de un sinsacro. 7) Tarsales fusionados. 8) Metatarsales fusionados

La posición filogenética del ave de Las Hoyas es intermedia entre *Archaeopteryx* y las aves posteriores; es decir, constituye el grupo hermano de las Ornithurae (Hesperornitiformes + Carinatae) más cercano. Este clado (nodo B) está definido por las siguientes sinapomorfías principales: 2) serie caudal constituida por un grupo de vértebras libres y un pigostilo. Tanto en los dinosaurios carnívoros como en *Archaeopteryx*, el esqueleto axial caudal está constituido por un elevado número de segmentos vertebrales. En el nuevo fósil español y en Ornithurae las últimas vértebras caudales se fusionan para dar lugar a una pieza única, el pigostilo, elemento esquelético sustentador de la rabadilla. El ave fósil de Cuenca registra la primera aparición conocida de este carácter. 3) Aparato gastral reducido o ausente. Debido, quizás, a la presencia de un aparato esternal osificado de gran desarrollo, las aves modernas han perdido el aparato gastral, que conservan, empero, los dinosaurios terópodos y *Archaeopteryx*. 4) Coracoides expandido distalmente, en forma de "T". La aparición de esta morfología coracoidal es uno de los rasgos típicamente avianos, aunque ausente en *Archaeopteryx*. Tal estructura coracoidal permite la unión entre la cintura escapular y el esternón. Se trata de una disposición biomecánicamente necesaria para la realización de un vuelo activo y eficaz. 5) Fúrcula (hueso del deseo u horquilla) con ramas poco divergentes y una desarrollada apófisis medial (hipocleidium). La fusión clavicular (aparición de una fúrcula) es un fenómeno que se produce ya en algunos dinosaurios terópodos; *Archaeopteryx* presenta también una fúrcula bien definida. En ambos casos las ramas furculares tienden a ser muy divergentes. En la nueva forma española y en aves posteriores, la fúrcula acerca sus ramas (bajo ángulo interclavicular).

Por otra parte, el ave de Cuenca carece de las sinapomorfías que caracterizan a las Ornithurae. Pueden, entre otras, citarse las siguientes: 6) fusión de los elementos de la cintura pelviana y aparición de un sinsacro, 7) tarsales fusionados, y 8) metatarsales fusionados.

El descubrimiento de la nueva forma aviana del Cretácico inferior español implica la revisión de la distribución de algunos caracteres en la filogenia y la reevaluación de la interpretación de algunos grupos de aves fósiles, los Hesperornitiformes, por ejemplo. Se trata de un grupo de formas acuáticas especializadas. Tradicionalmente, su incapacidad voladora se consideraba una

adquisición secundaria; algunos autores, sin embargo, fiados en la probable ausencia de vuelo activo en *Archaeopteryx*, no admitían ese supuesto. El descubrimiento del ave del Cretácico español, dada su probable capacidad para el vuelo activo, parece indicar que la primera hipótesis es la correcta, es decir, los Hesperornitiformes proceden de formas voladoras que secundariamente perdieron esta capacidad.

La nueva forma fósil aviana del yacimiento de Las Hoyas indica que varios rasgos típicos de los grupos más modernos de aves, piénsese en la aparición de un coracoides en "T" y el pigostilo, surgen en un momento de la historia evolutiva del grupo muy anterior de lo que hasta ahora se creía. (J. L. Sanz.)



2. Ave fósil, del tamaño de un gorrión, descubierta en el yacimiento conquense de Las Hoyas

¿Choque de estrellas?

Varias veces, a lo largo de los últimos 600 millones de años, algo modificó las condiciones globales de la Tierra de tal modo que una porción importante de todas las especies se extinguió muy pronto. En la más famosa de esas extinciones en masa, la de finales del período Cretácico, hace 65 millones de años, murió más de la mitad de todas las especies, incluidos, así se cree, los últimos dinosaurios. Las hipótesis presentadas para explicar esos fenómenos han constituido el objeto de encendidos debates.

La hipótesis más polémica la presentaron en 1980 Luis W. Alvarez, del Laboratorio Lawrence Berkeley, y sus colegas. Proponía que la extinción en masa de finales del Cretácico se debió al impacto de un meteorito o un cometa del tamaño de una montaña. El polvo levantado por la colisión bloqueó la luz del sol e impidió la realización de la fotosíntesis, muriendo en pocas semanas la mayoría de los seres vivos.

La prueba principal era un estrato muy delgado de arcilla enriquecida en el elemento iridio, situado, en distintas partes del mundo, en el límite entre los períodos Cretácico y Terciario (límite K-T). El iridio es un elemento poco abundante en la corteza terrestre, pero más común en algunos meteoritos. Alvarez calculó que un meteorito de 10 kilómetros de diámetro habría arrojado a la atmósfera una cantidad suficiente de polvo enriquecido en iridio para explicar el estrato de extensión mundial.

La teoría de Alvarez se vio reforzada ante el descubrimiento de que el estrato de arcilla del límite K-T contenía hollín, producido por los incendios causados por el impacto. Más impresionantes aún resultan los granos de cuarzo hallados el año pasado por Bruce F. Bohor, del Servicio Geológico de los Estados Unidos, en puntos del estrato repartidos por todo el mundo: presentan múltiples planos de distorsión, atribuidos a un choque de gran potencia. Hasta entonces sólo se había descubierto esa forma de cuarzo en las cercanías de cráteres de impacto; su distribución mundial venía a sugerir un cataclismo general.

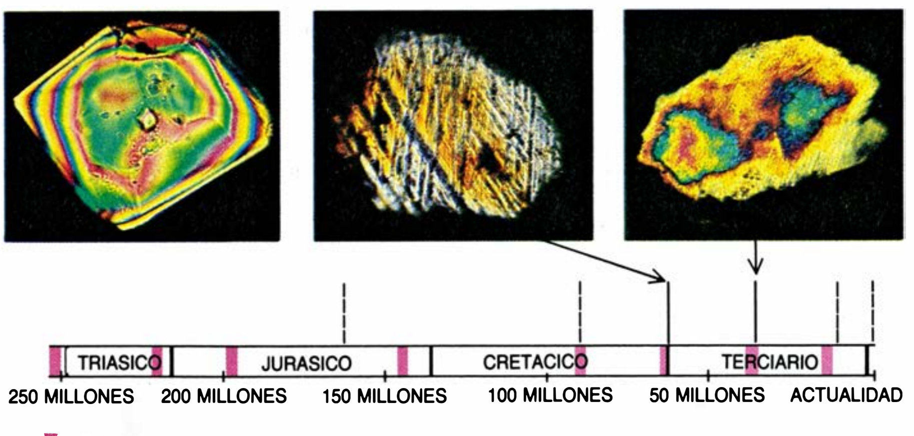
¿Dónde se encuentra el punto de impacto? La ausencia de un cráter conspicuo correspondiente a aquella época preocupó a los abogados de la hipótesis durante varios años. Hoy, pese a medir 200 kilómetros menos que lo predicho por Alvarez, se considera el mejor candidato una estructura de impacto de aquella época, de 35 kilómetros de anchura, bajo tierras de Manson, Iowa. Según Glen A. Izett, del Servicio Geológico, el yacimiento norteamericano explicaría por qué los granos de cuarzo de planos múltiples del estrato K-T resultan varios órdenes de magnitud más abundantes, y también mayores, en Estados Unidos que en Europa.

Ronald, G. Prinn, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, ha corroborado la primera hipótesis del asteroide con la propuesta siguiente: las extinciones fueron producto de la lluvia ácida desencadenada por el brusco caldeamiento de la atmósfera. Los cálculos apuntan que un meteorito de unos pocos kilómetros de diámetro produciría una cantidad de óxidos de nitrógeno suficiente para que, en una extensa área, la lluvia se convirtiera en una solución fuerte de ácido nítrico. J. Douglas Macdougall, de la Institución Scripps de Oceanografía, ha hallado pruebas en favor de la hipótesis de la lluvia ácida. Detectó un cambio brusco de la composición isotópica del estroncio en sedimentos marinos correspondientes al límite K-T, provocado verosímilmente al incrementar la lluvia el ritmo de disolución del estroncio retenido en los continentes.

A pesar de todo, la teoría del asteroide no ha recibido un apoyo unánime. Algunos discrepantes argumentan que tanto las extinciones masivas como las señales del límite K-T son fruto de un fenómeno distinto, mientras que otros (incluidos muchos paleontólogos), sin entrar en polémica sobre las pruebas geológicas que hablan del impacto, niegan que éste causara las extinciones en masa.

Charles B. Officer, del Darmouth College, y Neville L. Carter, de la Universidad A&M de Texas, se encuadran entre los primeros. En su opinión, la intensa actividad volcánica registrada a finales del Cretácico, sumada al descenso del nivel del mar que tuvo lugar en aquel tiempo, podrían haber provocado los rasgos geológicos en cuestión y la extinción en masa. Officer sostiene que la anomalía de iridio K-T no presenta una distribución global uniforme y que se encuentra iridio hasta dos metros por encima y por debajo del límite K-T. Tal pauta indica que el iridio no lo depositó de una sola vez ningún impacto, sino que ascendió del manto terrestre a lo largo de miles de años; la lluvia ácida provocada por las erupciones habría contribuido a la extinción.

Officer y Carter han encontrado lo que consideran cuarzo de planos múltiples en asociación con el iridio que se



3. Cuarzo intacto (izquierda), *cuarzo K-T con estrías producidas por un impacto* (centro) *y cuarzo de finales del Eoceno* (derecha), *con signos menos evidentes de haber sufrido una colisión*

presenta separado del límite. Creen que el cuarzo recibió el impacto de la actividad volcánica y que ello demuestra que también el iridio se originó en los volcanes. Bohor discrepa; opina que el cuarzo de Officer y Carter lo deformó la actividad tectónica ordinaria. Añade que, si los rasgos de haber sufrido impacto pudieran producirse por vulcanismo, resultarían habituales en la roca volcánica.

Otros discrepantes señalan que el iridio y el cuarzo se concentran en la porción superior de la arcilla que constituye el límite anómalo; por tanto, antes de su deposición debía estar ya en curso algún otro cambio de escala global. Algunos teóricos que defienden la caída de un cuerpo celeste replican a la objeción con otra hipótesis: en un período temporal muy breve, "en un final de semana," sugiere Eugene M. M. Shoemaker, del Servicio Geológico, se produjeron varios impactos. Los primeros meteoritos contendrían poco iridio y chocarían contra el océano, que carece de cuarzo, arrojando hacia arriba los restos que contiene el estrato de arcilla; un impacto posterior depositaría el iridio y el cuarzo que muestra las huellas del golpe.

Otros objetores, por fin, sostienen que el registro fósil no apoya la tesis de las extinciones catastróficas. J. David Archibald, de la Universidad de Yale, que ha analizado en Montana algunas de las mejores estirpes fósiles que cubren el límite K-T, ejemplifica la opinión de muchos paleontólogos. Argumenta que muchos grupos murieron mucho antes de la deposición del estrato y que, aun de registrarse un gran impacto, no explicaría ese prolongado declive. Con los dinosaurios y los reptiles voladores, se extinguieron muchos animales marinos y plancton en el límite K-T o cerca de él, pero sobrevivieron numerosos vegetales terrestres, animales de aguas dulces y de los fondos oceánicos. Como Officer y Carter, se cree en la hipótesis de la pluralidad de causas.

En efecto, según parece, la mayoría de las "extinciones en masa" fueron fenómenos complejos, de varias fases, que, por regla general, abarcaron centenares o miles de años, y no unos pocos meses. Pese a ello, algunos geólogos han pretendido aplicar la interpretación del impacto a otras extinciones masivas. Sólo se acepta sin objeciones la presencia, en el registro geológico, de otra capa de iridio; corresponde a finales de la época eocénica, hace unos 35 millones de años. Recientemente se ha encontrado cuarzo de planos múltiples frente a la costa de New Jersey, más o menos en el mismo nivel que el estrato de iridio. Sin embargo, no está clara la relación que guardan entre sí los supuestos impactos y las importantes extinciones ocurridas alrededor de aquellos tiempos. David M. Raup, de la Universidad de Chicago, afirma que se han descubierto capas de iridio en otros límites estratigráficos, algunos de los cuales parecen coincidir con las extinciones en masa, si bien la extensión de esas capas podría tener sólo un alcance regional.

Para reconciliar la naturaleza escalonada de las extinciones masivas con las teorías del impacto extraterrestre, se ha dicho que habría varias caídas a lo largo de un período dilatado, aunque breve en la escala geológica, de unos centenares o miles de años. Según Piet Hut, del Instituto de Estudios Avanzados, una perturbación de la nube de Oort, los miles de millones de cometas que, así se supone, orbitan alrededor del sol mucho más allá de Plutón, podría ser la causa de gran número de impactos. Los cálculos indican que el paso de una estrella cerca del sol arrancaría millones de cometas de la nube de Oort; es probable que, en el transcurso de uno o dos millones de años, colisionaran contra la tierra varias decenas de esos cometas errantes.

La generalización de la primitiva hipótesis de Alvarez consideraría una lluvia periódica de cometas. La perturbación cíclica de la nube de Oort explicaría la periodicidad de 26 millones de años que Raup y su colega J. John Sepkoski, Jr. encuentran en los últimos 250 millones de años. Se discute la idoneidad del análisis estadístico que resaltó esa recurrencia cíclica, pero, según Raup, la teoría de la extinción periódica se encuentra "sana y salva, aunque un poco nerviosa". Se han propuesto, y discutido, diversos desencadenantes astronómicos de las precipitaciones periódicas, incluido el paso regular del sistema solar por los brazos de nuestra galaxia y el plano galáctico.

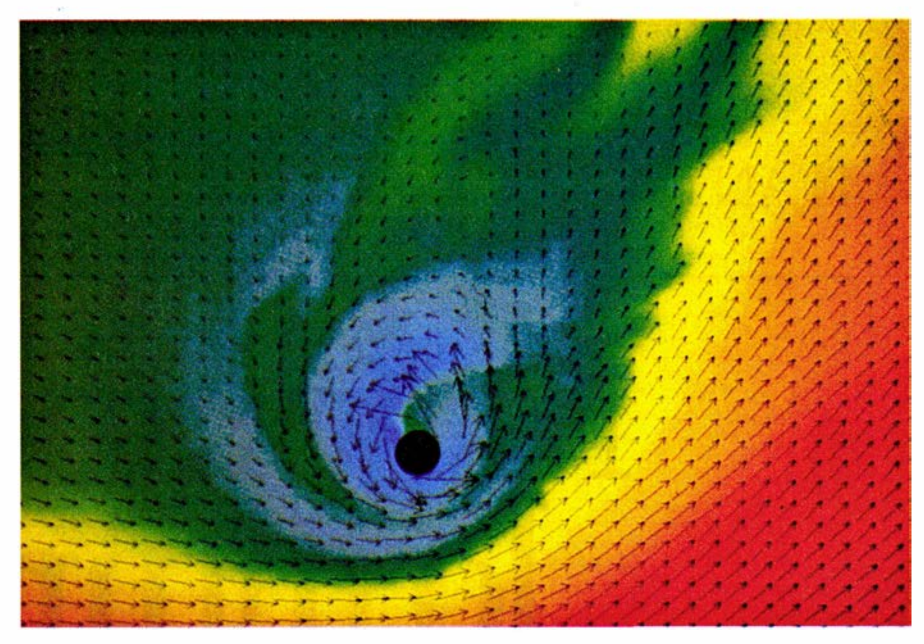
Fragua cósmica

La supernova 1987A ha aportado recientemente pruebas impresionantes de que las estrellas en proceso de explosión crean elementos pesados a partir de elementos ligeros y los esparcen por el universo. De ese modo se ha dado por fin respuesta a la cuestión del origen primigenio de los metales que se encuentran en la tierra y en el resto del sistema solar.

¿Puede entonces darse carpetazo al asunto? W. David Arnett y Liping Jin, del Instituto Fermi de la Universidad de Chicago, y Sandip K. Chakrabarti, del Instituto de Tecnología de California, proponen que los elementos pesados podrían proceder también de otra fuente, de extraordinaria potencia: los agujeros negros.

Según esta teoría, la materia capturada en el campo gravitatorio de un agujero negro gira violentamente en espiral a su alrededor antes de precipitarse definitivamente en él. Si la materia posee un momento angular suficiente, puede generar un "disco de acreción" en torno al agujero negro. "Te acercas a la boca del dragón, afirma Arnett, pero sin osar entrar en ella."

Ayudados de ordenadores, y modificando diversos parámetros, como la masa del agujero negro y la composición de la materia que alimenta el disco, los tres investigadores han simulado las condiciones termodinámicas de los discos de acreción. Los modelos sugie-



4. Disco de acreción gaseoso que se arremolina alrededor de un objeto dotado de un potente campo gravitatorio en una simulación realizada por ordenador por Bruce A. Fryxell, de la Universidad de Chicago. El gas relativamente poco denso (rojo) *se vuelve más denso* (azul) *al aproximarse al objeto*

ren que algunos podrían alcanzar densidades y temperaturas suficientes para albergar en su interior reacciones de fusión termonuclear.

Los autores opinan que las condiciones más favorables a la nucleosíntesis se darían en los discos de acreción de los agujeros negros de masas relativamente bajas (quizá los restos del colapso de estrellas solitarias); la temperatura del centro del disco superaría el millar de millones de grados Celsius, suficiente para generar metales. Según parece, a medida que el agujero negro acumulara masa, la densidad y temperatura de su disco de acreción se reducirían. Ello no obstante, el grupo propone que incluso los discos de acreción de los agujeros negros supermasivos (formados por un millón de masas solares o más y que se cree que existen en el corazón de los cuásares y de muchas galaxias), podrían convertir el hidrógeno en helio y producir pequeñas cantidades de elementos más pesados.

¿Cómo se forjan los elementos en los discos de acreción dispersos por el espacio? Arnett señala que, según creen algunos autores, la elevada intensidad de las radiaciones podría provocar, en algunos discos, la expulsión de materia en dirección perpendicular al plano de los mismos. Esa hipótesis se ha propuesto para explicar los grandes "chorros" que se proyectan de algunas galaxias y sistemas de estrellas binarias. Los datos espectroscópicos sugieren que algunos de esos chorros podrían contener elementos pesados.

Parte de los metales observados en el sistema solar y en otros sitios de la Vía Láctea quizá los haya originado, durante su aparición, un agujero negro situado en el centro de la galaxia, según especula Jin, quien afirma asimismo que la nucleosíntesis de los agujeros negros explicaría por qué algunas estrellas de mucha edad de nuestra galaxia contienen elementos más pesados que los que, según se cree, se formaron durante la gran explosión. La propuesta más radical del grupo es que, parte del helio supuestamente formado durante los primeros estadios de la gran explosión, se habría generado posteriormente en los agujeros negros. La abundancia cósmica de helio constituye uno de los pilares del modelo convencional de la gran explosión.

Otros investigadores de los discos de acreción han manifestado cierto escepticismo. Douglas N. C. Lin, de la Universidad de California en Santa Cruz, sostiene que antes de que los discos se caldeen lo suficiente para instar la nucleosíntesis se expandirán y se enfriarán. Bohdan Paczynski, de la Universidad de Princeton, señala que los chorros (la principal prueba aportada por Arnett, Jin y Chakrabarti) constituyen un "rompecabezas sin resolver". Arnett admite que "existen algunos huecos en nuestras interpretaciones"; y sostiene: "si dispusiéramos de datos más válidos, por ejemplo, mejores análisis de los chorros cósmicos, quizá pudiera llenarse esas lagunas. Ha llegado el turno de los observadores".

Grúas de construcción

Estas máquinas elevadoras se han diversificado en diferentes formas para satisfacer las necesidades especiales de las obras urbanas y son componentes indispensables en el gremio de la construcción

Lawrence K. Shapiro y Howard I. Shapiro

Las grúas han sido herramientas fundamentales del sector de la construcción desde hace siglos. En un ambiente urbano moderno, donde la construcción se eleva hacia las alturas, los brazos extendidos de las grúas engalanan el cielo como emblemas del desarrollo e indicadores de la salud económica de una ciudad. Ni que decir tiene que, para el constructor, son algo más. Encuentra en ellas unas máquinas poderosas y maniobrables que hacen viable, desde el punto de vista económico, la construcción de un rascacielos.

El aspecto y la capacidad de estas máquinas han cambiado drásticamente a través de los años, pero su función ha permanecido inalterable. Las grúas emplean cables y poleas para subir y bajar cargas, demasiado pesadas, si así no fuera, para levantarlas del suelo; una vez en lo alto, las grúas mueven las cargas horizontalmente y las colocan en su sitio con precisión.

Ya en el siglo primero después de Cristo las grúas actuaban por la fuerza del hombre que elevaba y bajaba cuerdas desplazando el peso de su cuerpo en el interior de una rueda de avance circular. Pero no fue hasta el siglo XIX, con la introducción de la máquina de vapor, cuando se registró un progreso significativo relativo a la fuente de impulsión. Las grúas actuales portan incorporados microprocesadores y otros avances técnicos para el control de la carga, aceros de alta resistencia para reducir el peso en zonas críticas y refinados sistemas de transmisión de potencia para un dominio de ajustada precisión.

A grandes rasgos, una grúa es un sistema de aparejo de poleas que se suspende de un brazo, o aguilón, y se impulsa con su propio motor. En el dispositivo más sencillo hay una única cuerda que va del gancho a una polea, denominada polea de guía, en el extremo del aguilón y hasta un tambor de enrollamiento cerca de la base del aguilón. Cuando el operario de la grúa tira de la palanca de elevación, el tambor comienza a girar; el cable metálico de elevación, al enrollarse en el tambor, provoca que el gancho y su carga se icen adecuadamente.

No hay ninguna ventaja mecánica en este sencillo sistema con una sola línea de cuerda; para levantar un objeto, la fuerza en la cuerda ha de ser ligeramente superior al peso de la carga. Puede obtenerse, sin embargo, una ventaja mecánica añadiendo poleas de guía y distribuyendo así el peso de la carga en varias líneas de cuerda. Por ejemplo, si se añaden dos poleas al bloque del gancho y tres en el extremo del aguilón del sistema de elevación, la ventaja mecánica se quintuplica (se pierde un pequeño porcentaje por rozamiento). Esto se acompaña con una reducción acoplada de la velocidad de subida del gancho (en este caso la ascensión se retarda en un factor de cinco). Las ventajas relativas de cada dispositivo deben evaluarse previamente: un trabajo que exige un tiempo corto de elevación necesitará una grúa con un sistema de polea sencilla; un trabajo que implique la elevación de cargas pesadas o la ascensión lenta de piezas de equipo delicadas requerirá una grúa de poleas múltiples.

Grúas modernas

Las grúas modernas se clasifican en dos categorías según el sector de empleo: las que se usan en la industria y las utilizadas en la construcción. Aunque la distinción entre ambas no es absoluta, los diferentes ambientes de trabajo necesitan a menudo grúas con prestaciones diversas. Además, hay una diferencia fundamental en las responsabilidades que recaen sobre los operarios de ambos tipos de máquinas. Las grúas industriales suelen ocuparse en trabajos repetitivos y bien definidos dentro de un entorno conocido, mientras que las grúas de construcción deben realizar múltiples tareas en condiciones mudables.

Un buen ejemplo de grúa industrial lo tenemos en las grúas de los muelles. Eleva contenedores de un tamaño y peso predeterminados desde una zona claramente definida a otra; cada elevación se desvía muy poco de la precedente. La localización geográfica, condiciones de sustentación y requisitos de manejo de carga de la grúa portuaria pueden determinarse con anterioridad, lo que permite instalar el modelo idóneo para las necesidades del trabajo. En algunos casos el proceso de elevación es tan repetitivo que puede automatizarse parcialmente y así rebajar las exigencias de su gobierno por operarios especializados.

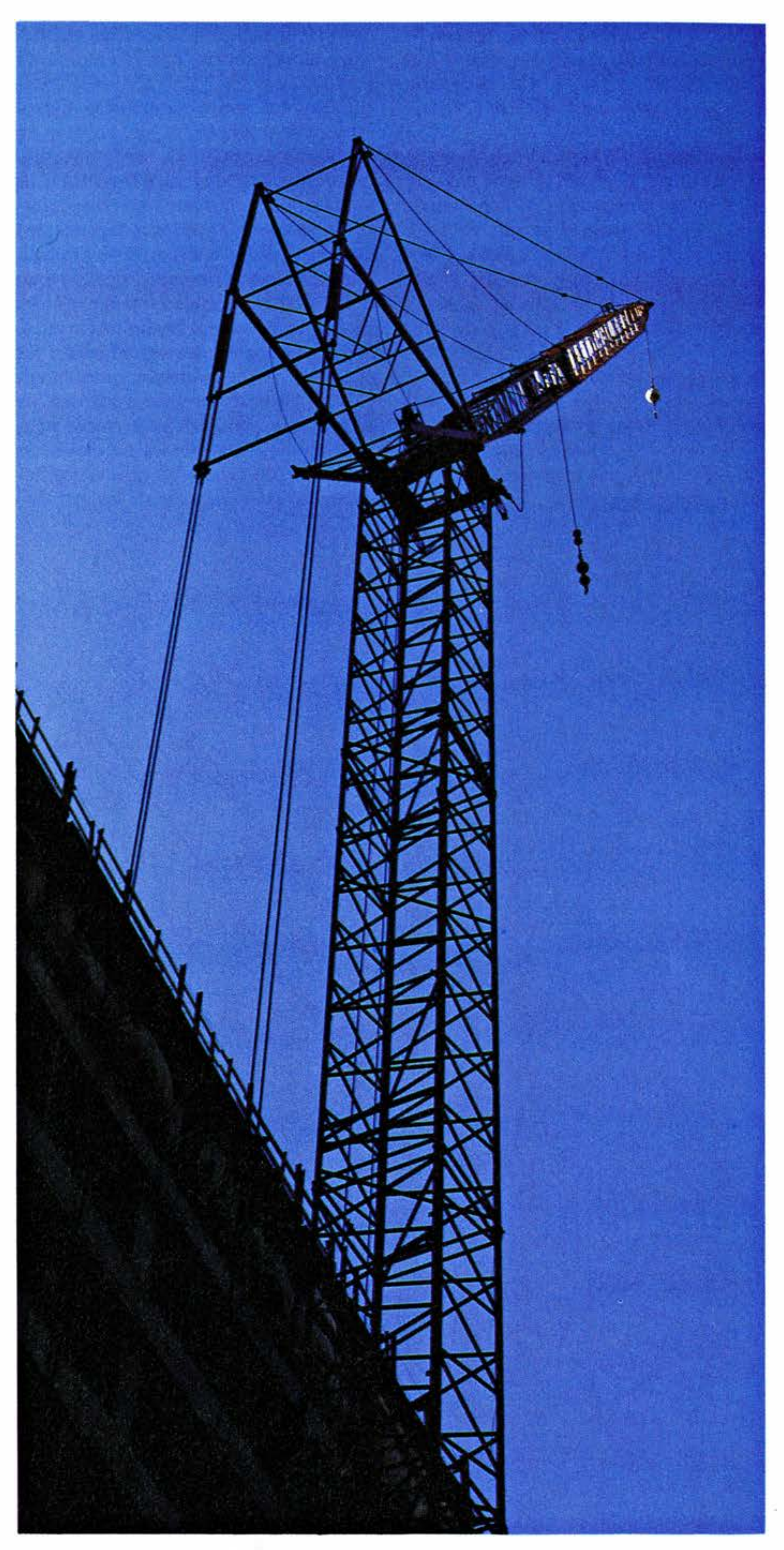
Las grúas de construcción, por otro lado, son unidades estándar de producción que deben trabajar en condiciones que no son constantes en absoluto; únicamente se definen de antemano las aptitudes de trabajo de la máquina. Por esta razón se confía bastante en la habilidad de las personas responsables de la planificación y del funcionamiento de estas grúas. También las condiciones del emplazamiento y los requisitos de elevación pueden diferir entre un proceso de construcción y el siguiente y en el curso de la construcción en una misma obra al ir progresando el trabajo desde los fundamentos hasta el tejado. Una grúa de torre (llamada así porque trabaja desde la parte superior de una estructura con forma de torre) puede operar en un determinado entorno al comienzo de un proyecto, cuando está al abrigo de fuertes vientos, y en condiciones diferentes al final, cuando

puede estar golpeada en su máxima altura por vientos de 160 kilómetros por hora.

Las grúas de construcción que trabajan hoy en los Estados Unidos se caracterizan por su extraordinaria diversidad, un fenómeno que puede explicarse al menos parcialmente por la distinta evolución de las grúas en Europa y Norteamérica. En Europa las grúas modernas se diseñaron para trabajar en ciudades de densa población con edificios no muy altos y calles estrechas. Estas condiciones necesitaban grúas que fueran silenciosas, discretas y seguras. La respuesta a estas exigencias fue la grúa de torre que conoció una gran expansión durante la década de los cincuenta. Es una estructura alta, esbelta y reticulada que se eleva por encima del edificio en construcción y presenta la ventaja de tener al operario y al brazo de trabajo por encima de la obra. Además, debido a que estas grúas están equipadas con motores eléctricos, pueden trabajar silenciosamente si bien con una capacidad limitada de elevación, velocidad y aceleración.

Por el contrario, la industria de grúas estadounidense tuvo sus comienzos en el cinturón de industria pesada del Medioeste. Las grúas comenzaron a proliferar allí a principios del siglo XX, fabricadas por las mismas compañías que producían palas de minería y equipo de excavación. Estos primeros fabricantes de grúas no se preocupaban de las aglomeraciones urbanas, sino que buscaban una máquina versátil que pudiera aplicarse en múltiples trabajos, desde la construcción al drenaje de ríos a la excavación del suelo. Por esa razón, diseñaron grúas móviles, robustas y poderosas, que estaban impulsadas por motores de combustión interna. Estas grúas funcionaban en su mayoría según la habilidad del operario. Un experto podía manejar la máquina y la carga con suavidad, pero el gran poder de la grúa podía conducir a su autodestrucción si la gobernaba un operario inexperto.

En la década de los 50 se introdujeron aceros de alta resistencia en el momento en que los factores económicos exigían edificios residenciales más altos. Este desarrollo condujo a la aparición de la grúa móvil de aguilón largo montada sobre un chasis de camión o una base con cadenas de oruga. A partir de ese punto, la grúa móvil se convirtió en una característica urbana a la que se unió varios años después la grúa de torre. Actualmente se fabrican y dis-



1. GRUA MOVIL SOBRE ORUGAS CON AGUILON de torre bajando su gancho hasta el suelo, donde cargará un cubo de cemento para el edificio de estructura de hormigón que se está levantando a su lado. El inmueble, que en la fotografía tiene 12 pisos, está proyectado para albergar 45 pisos cuando esté terminado.

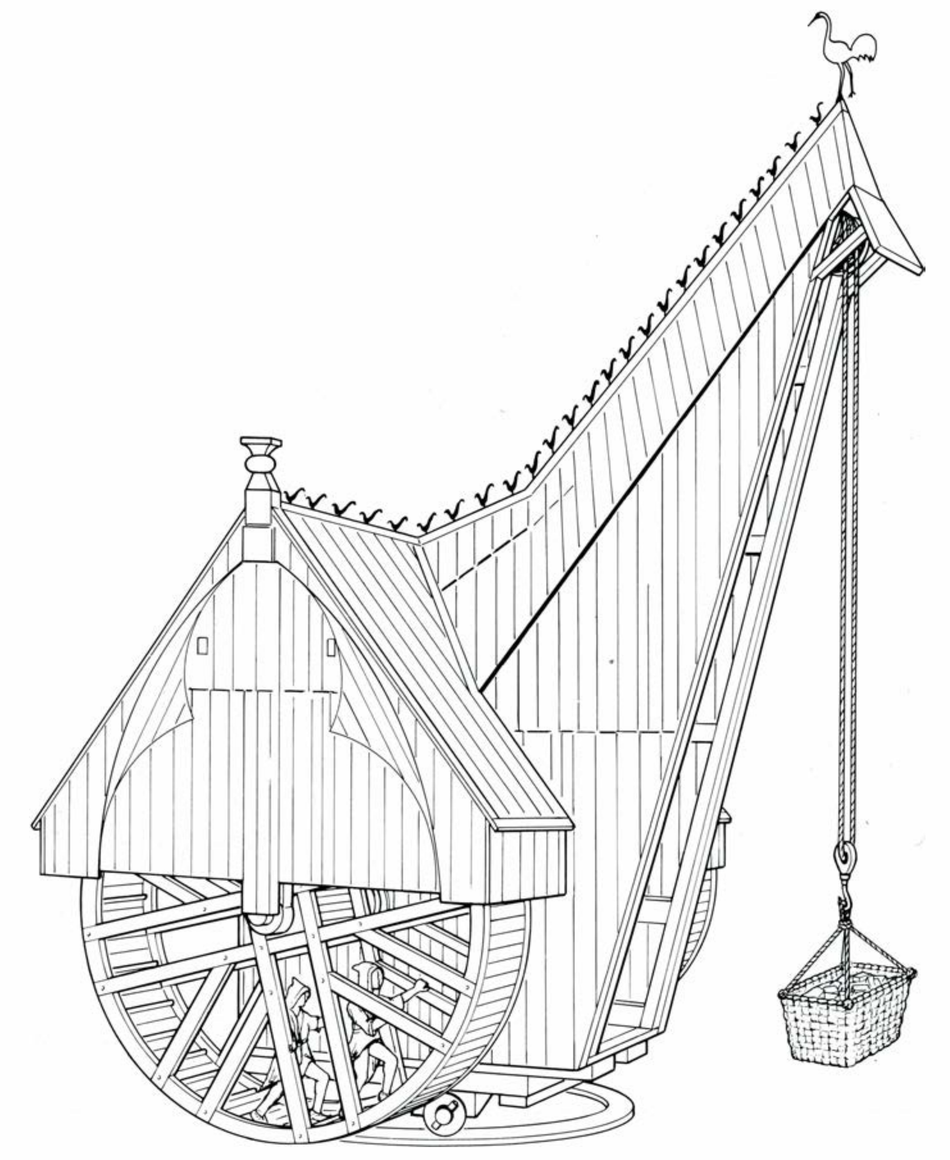
tribuyen en todo el mundo grúas de construcción de todos los tipos. Las grúas móviles y las de torre son también elementos habituales del paisaje urbano.

La seguridad y la economía dictan la selección de la grúa correcta para un trabajo de construcción. Un edificio de seis pisos de altura demanda un trato distinto de otro de sesenta pisos. Otros factores que han de considerarse son el terreno de la obra, la proximidad de edificios colindantes, el tráfico de transeúntes y las características especiales de la estructura que se construye.

Las grúas móviles (en contraste con las grúas de torre) poseen la ventaja de poder moverse autónomamente en el emplazamiento de trabajo, lo que les da una gran flexibilidad. Pueden dividirse en dos grupos básicos: las que llevan neumáticos y las que van montadas sobre orugas.

Las grúas sobre neumáticos tienen un peso bastante ligero y se acoplan en un chasis de camión, de modo que pueden desplazarse de una obra a otra. Los modelos pequeños pueden transportarse sin desmontar por las autopistas; los mayores pueden transportarse también a través de las autopistas, siempre que se desmonten parcialmente para que su peso total no supere los límites legales. Aunque estos límites varían según los estados y países (situación problemática para diseñadores y transportistas de grúas), son normales grúas sobre neumáticos con capacidades de elevación de hasta 300 toneladas que viajan legalmente en la mayoría de las jurisdicciones. Cuando una grúa sobre neumáticos llega a una obra, ha de colocarse y estabilizarse antes de que pueda trabajar. Han de extenderse los soportes de fijación; la grúa se eleva hidráulicamente apoyándose sobre un madero o una placa de acero que distribuya su peso.

Las grúas sobre orugas son más incómodas de transportar hasta el pie de obra, pero no necesitan soportes de fijación y, a diferencia de las grúas de camión, pueden moverse dentro de la obra mientras transportan una carga. Para desplazarse entre los distintos emplazamientos, sin embargo, deben montarse en remolques de plataforma o en vagones de ferrocarril del mismo tipo; normalmente se desmontan en piezas para cumplir las limitaciones de peso y anchura. Las cadenas de orugas tienen la ventaja de que distribuyen el peso de la grúa sobre una zona extensa de terreno. Esa es la razón por la que una grúa de oruga puede moverse con carga en su gancho.



2. GRUAS MOVIDAS POR FUERZA HUMANA, como la ilustrada aquí, fueron artilugios corrientes de elevación en los muelles del siglo XVI. Andando en el interior de unas grandes ruedas, llamadas jaulas de ardilla, situadas una a cada lado del armazón de la grúa, los trabajadores rodaban un tambor de enrollamiento en el que se devanaba la cuerda y elevaba el gancho portador de la carga. Las grúas se montaban en un pivote central y sobre unos rodillos y podían girarse 360 grados. (Recreación de Hank Iken.)

Variaciones en el diseño del aguilón

Existen grúas de camión con dos tipos de aguilón, cuya selección depende de las necesidades de cada trabajo específico. Los aguilones telescópicos, como su nombre indica, constan de múltiples secciones anidadas que el operario puede extender o retraer. Las grúas pequeñas sobre neumáticos equipadas con aguilones telescópicos se conocen familiarmente por grúas de pico de pato ("cherry pickers"). Gozan de una gran movilidad y las hay con capacidades de elevación que van desde 15 a 80 toneladas; son muy apropiadas para utilizarlas como máquinas de servicio rápido y para usos generales. Complementan así a las grúas grandes en las obras de cierta magnitud. Los modelos telescópicos mayores tienen capacidades de elevación de hasta 500 toneladas y aguilones que pueden extenderse hasta los 60 metros. Pueden añadirse puntales de extensión al aguilón para alcanzar una altura superior incluso.

Las grúas telescópicas tienen su talón de Aquiles en el peso del aguilón; el aguilón voladizo (formado por secciones superpuestas en forma de caja) ofrece un rendimiento de la estructura menos eficaz, de suerte que se requieren grandes aguilones pesados para conferir resistencia al conjunto. El peso suplementario hace que estas grúas tengan una baja capacidad de

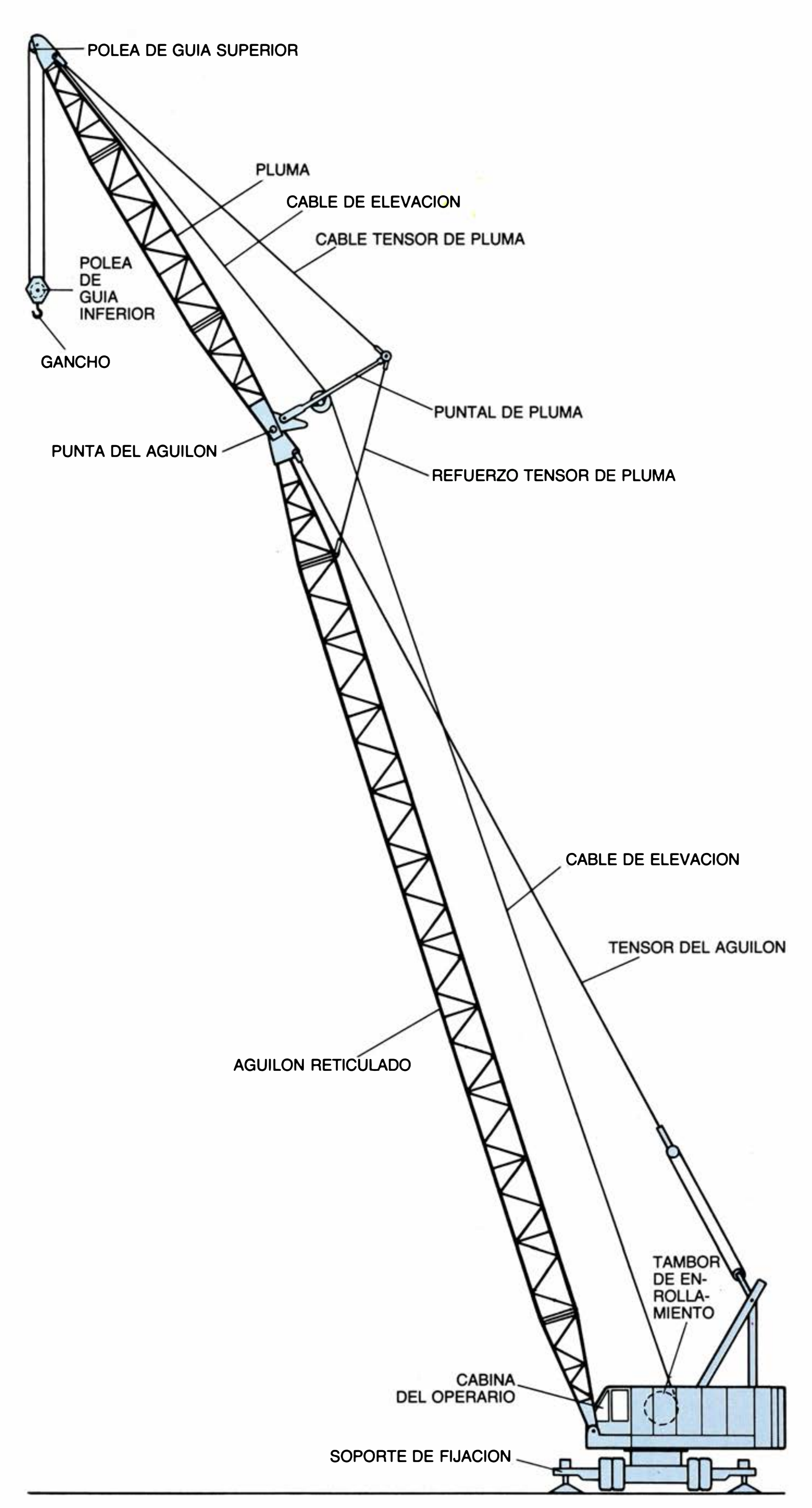
elevación para radios de acción largos. Otra desventaja de las grúas telescópicas reside en su coste: son las más caras de todas las grúas de construcción por kilogramo de capacidad de elevación. La rapidez con que pueden ponerse a trabajar después de su llegada a una obra compensa, sin embargo, su coste inicial. Debido a esa virtualidad, algunos contratistas las ofrecen como un servicio de taxi y trabajan, en el mismo día, para varios clientes.

El otro tipo de aguilón utilizado en grúas móviles (en ambos modelos sobre neumáticos y sobre orugas) es el aguilón reticulado. Consta de un conjunto de tubos de acero de alta resistencia o angulares de hierro dispuestos en armazón tridimensional. El aguilón, formado por múltiples secciones atornilladas o remachadas, puede montarse hasta longitudes de 120 metros y aumentarse después hasta 30 metros más añadiendo una pluma, o extensión ligera unida en el extremo del aguilón. Uno de este tamaño se ha utilizado para construir edificios de 46 pisos.

Aunque es posible construir aguilones reticulados de mayor longitud, no suele ser práctico hacerlo. La resistencia del aguilón está relacionada con la razón longitud-anchura. Como los aguilones con una sección mayor de dos metros y medio necesitan permisos especiales para transportarlos en camión, esta dimensión es una limitación práctica de su tamaño.

A diferencia de los telescópicos, los aguilones reticulados necesitan un montaje en varias etapas después de llegar al emplazamiento de trabajo. Los que son cortos pueden doblarse por la mitad, llevarse hasta su destino y ponerse a trabajar dos horas después de su llegada. Los aguilones más largos deben desmontarse y transportarse en camión hasta el pie de obra, donde se tarda hasta cinco horas en acoplarlos nuevamente.

Una variación reciente del aguilón reticulado, que se ha hecho muy popular para su uso urbano, es un híbrido entre la grúa de torre y la móvil; se llama fijación en torre. Consta de una sección de torre vertical, montada sobre una cadena de orugas, que está equipada con un aguilón reticulado en su parte superior. La torre sube paralelamente a la fachada del edificio y coloca el aguilón de trabajo a cierta altura. Esta grúa híbrida tiene la mayoría de las ventajas de ambos tipos de grúas, pero su altura máxima se suele cifrar en torno a los 60 metros y su base ocupa una gran superficie de terreno.



3. GRUAS MOVILES DE AGUILON RETICULADO presentes en muchas obras urbanas. Manejando diversas palancas, el operario sube o baja el bloque del gancho, el aguilón y la pluma, o hace girar la parte superior de la máquina sobre su base. Las grúas sobre neumáticos como la presentada aquí están equipadas con unos soportes de fijación que les confieren estabilidad durante el levantamiento de la carga.

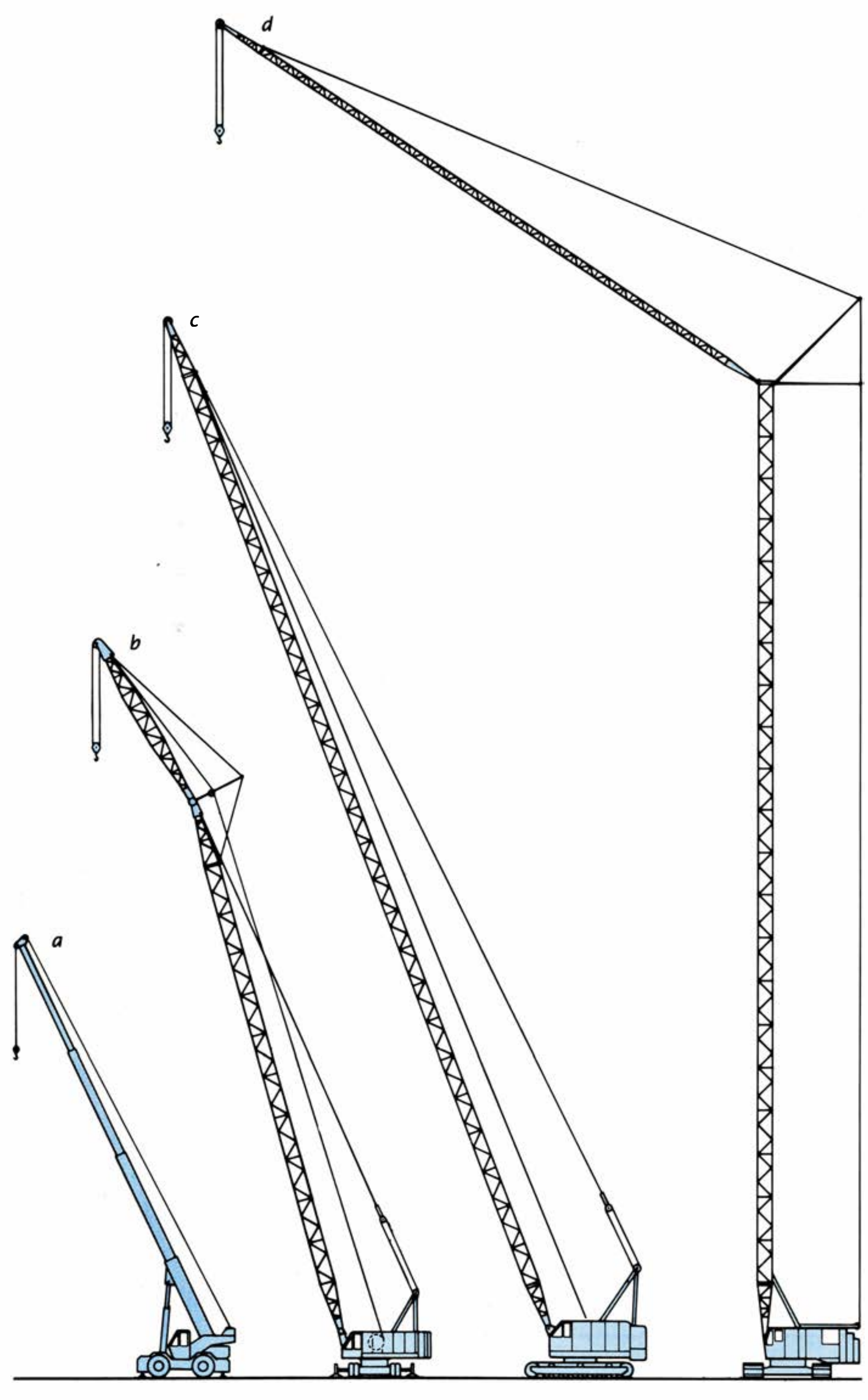
El tiempo medio necesario para montar este tipo de grúa es de unas 10 horas, que es mayor que para una grúa móvil pero menor que para una grúa de torre. El coste de transporte y montaje de estos prototipos los convierten en antieconómicos para trabajos que duren menos de unas pocas semanas.

Las grúas móviles de aguilón reticulado más antiguas se mueven mediante motores de combustión interna con caja de cambios. Igual que en un coche de transmisión manual, se transmite potencia al tambor engranando un embrague, conocido en este ramo como embrague de fricción. La velocidad de elevación se controla por las especificaciones de velocidad y par del motor; puede hacerse deslizando el embrague.

Liberando éste y aplicando el freno de pie, el operario suspende la carga a cualquier altura; para sostener la carga durante un período largo de tiempo se coloca un retén, o seguro, en un trinquete del tambor evitando el giro de éste. Cuando se ha de bajar la carga, el operario libera el seguro y controla el descenso soltando el embrague, el freno o ambos. El gancho cae libremente si se sueltan el freno y el embrague, con lo que este torno de caída libre puede ahorrar buena cantidad de tiempo en el retorno de una elevación cuando no hay carga en el gancho.

Ciertas grúas móviles modernas presentan un dispositivo hidrodinámico llamado convertidor de par, en sustitución de la transmisión mecánica. Este dispositivo mantiene constante la solicitud de potencia del motor ajustando la velocidad de elevación para acoplarse a cargas que tengan peso diferente. Para una carga dada, el operario puede variar la potencia y la velocidad de elevación, controlando la velocidad del motor. Para levantar una carga del suelo, la velocidad del motor debe aumentar hasta que la potencia venza la resistencia de la carga. Una vez que se ha levantado la carga del suelo, ésta puede detenerse y mantenerse a determinada altura reduciendo la velocidad (y potencia) del motor para acoplarla a la resistencia de la carga. Disminuyendo aún más la velocidad del motor, de manera que prevalezca la carga, puede bajarse el gancho a una velocidad controlada.

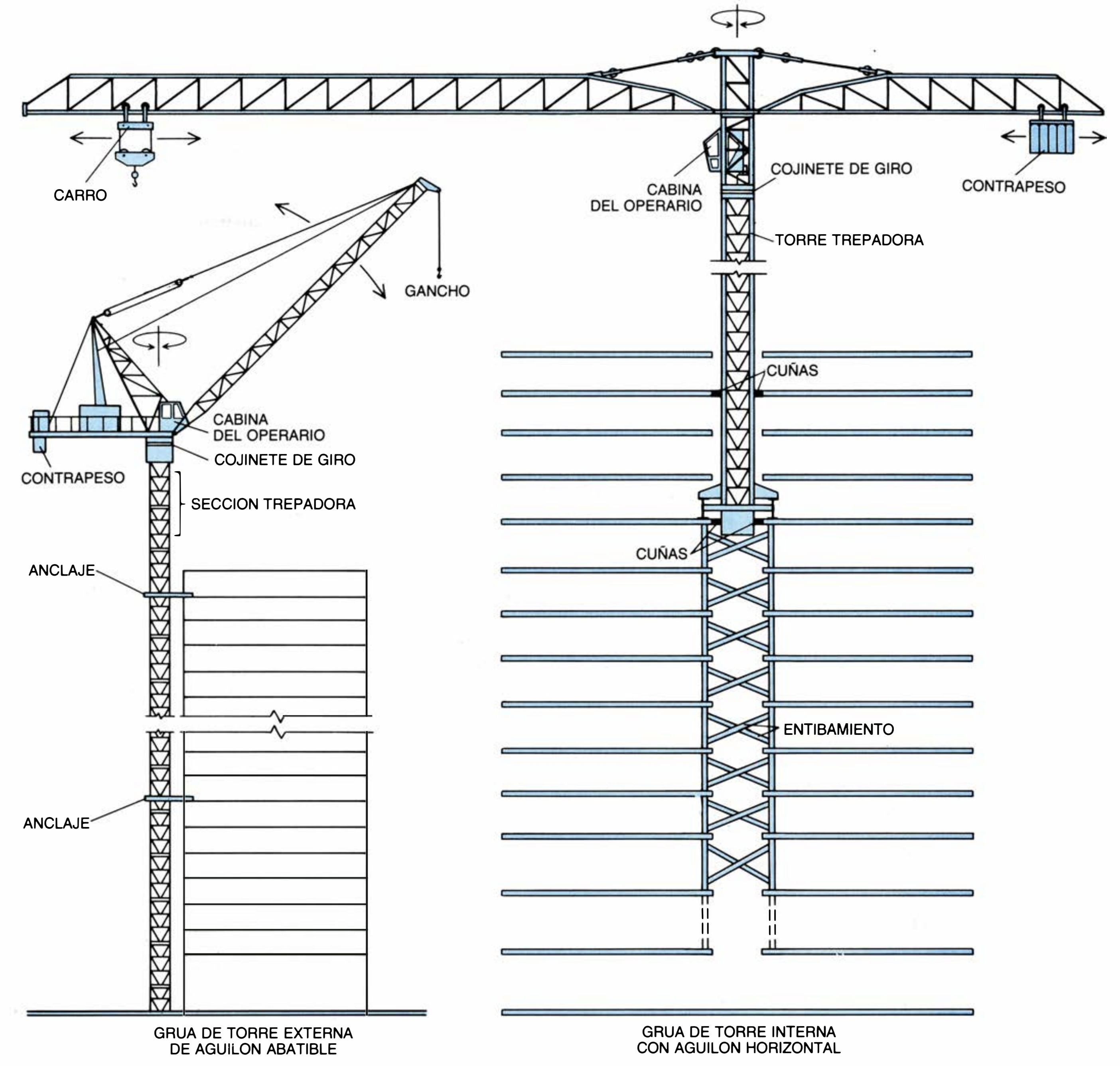
Lo mismo ocurre en un coche con transmisión automática: el coche puede mantenerse estático en una cuesta si se aplica la cantidad correcta de presión al pedal del acelerador; el coche irá hacia abajo si hay poca presión y avanzará hacia delante si hay demasiada presión. Un operario de grúa, al igual que el conductor de un coche, puede (y normalmente lo hace) usar el freno para lograr el mismo efecto, es decir, mantener la carga. El convertidor de par hace posible elevar y descender cargas más suavemente y con mayor control de lo que era posible con los antiguos sistemas mecánicos.



4. GRUAS MOVILES cuya longitud de aguilones varía. (Llámase aguilón al brazo de la grúa.) En este grabado están dibujados a la misma escala cuatro modelos representativos. De izquierda a derecha son: grúa de pico de pato (''cherry picker'') con aguilón telescópico (*a*), grúa sobre neumáticos con aguilón reticulado y pluma (*b*), grúa sobre orugas con aguilón reticulado (*c*) y grúa sobre orugas con fijación de torre (*d*).

Grúas de torre

Las grúas de torre se elevan con el edificio que ayudan a construir; posibilitan que sus operarios dispongan de una panorámica de lo que hay por debajo de ellos. A semejanza de las grúas móviles, giran y tienen un gancho de elevación para levantar cargas y moverlas en sentido radial, pero en otros aspec-



5. LAS GRUAS DE TORRE pueden ser externas (*izquierda*) o internas (*derecha*). Las externas aumentan su longitud al elevarse el edificio; las internas no aumentan la longitud de la torre sino que trepan hacia arriba con el edificio. En ambos casos, la cabina se eleva por encima del rascacielos que se construye; el operario dispone así de una panorámica de la obra desde el comienzo hasta el final. Las grúas de torre pueden diseñarse con aguilón abatible (*izquierda*) u horizontal (*derecha*). Estas últimas no pueden funcionar cuando hay obstáculos que impiden el giro del aguilón. Las grúas no están dibujadas a la misma escala.

tos no se parecen a sus parientes móviles.

Las grúas de torre pueden elevarse casi hasta alturas sin límite según se instalen en el interior o el exterior de un edificio. Una grúa de torre interna tiene una configuración fija: su torre de sustentación permanece con la misma longitud durante la realización de la obra. Se eleva mediante gatos hidráulicos que se trasladan de un piso a otro al ir creciendo la altura del edificio [*véase la figura 6*]. El peso de la grúa, normalmente por encima de las 50 toneladas, se soporta con la intervención conjunta de los gatos y el edificio.

En cada piso deben realizarse aperturas temporales algo mayores que la torre para permitir que la grúa se deslice por ellas cuando trepe hacia arriba. Las fuerzas de torsión y de vuelco de la grúa se transmiten al edificio mediante un juego de cuñas inferior y otro superior. No obstante, la máxima aceleración rotacional y la velocidad de giro del aguilón se mantienen bajas mediante controles automáticos para limitar la inercia de la masa giratoria y su efecto de torsión sobre la torre. Las grúas internas presentan una desventaja: cuando el trabajo se acaba, terminan en el tejado y hay que desmontarlas. Los componentes de la grúa se desmontan uno a uno y se bajan hasta los camiones; la operación, difícil, se prolonga incluso varias semanas.

Una grúa externa, por el contrario, es autoportante y crece en un lado del edificio. La base de la grúa se ancla en un cimiento de hormigón colocado cerca del edificio; inicialmente, la grúa es independiente de éste. Cuando el edi-

ficio alcanza la altura de alrededor de ocho pisos, la torre se ancla en la estructura del edificio y comienza a elevarse. Para ello se iza la parte superior de la grúa con gatos hidráulicos y se añade una nueva sección de torre inmediatamente debajo. El proceso de crecimiento continúa al subir el edificio y se van agregando anclajes a intervalos fijos que permitan una sustentación lateral.

Aunque la grúa de torre externa es más fácil de desmontar que la interna (el proceso de elevación puede invertirse hasta que la máquina se desmonte ya como una grúa móvil), no es adecuada para todos los edificios. Las casas en forma de tarta de bodas, por ejemplo, pueden tener la estructura tan alejada de la torre de la grúa que el anclaje no resulta económico. En cualquier caso, el gasto invertido en retirar grúas de torre confina su uso a las obras que duran seis o más meses.

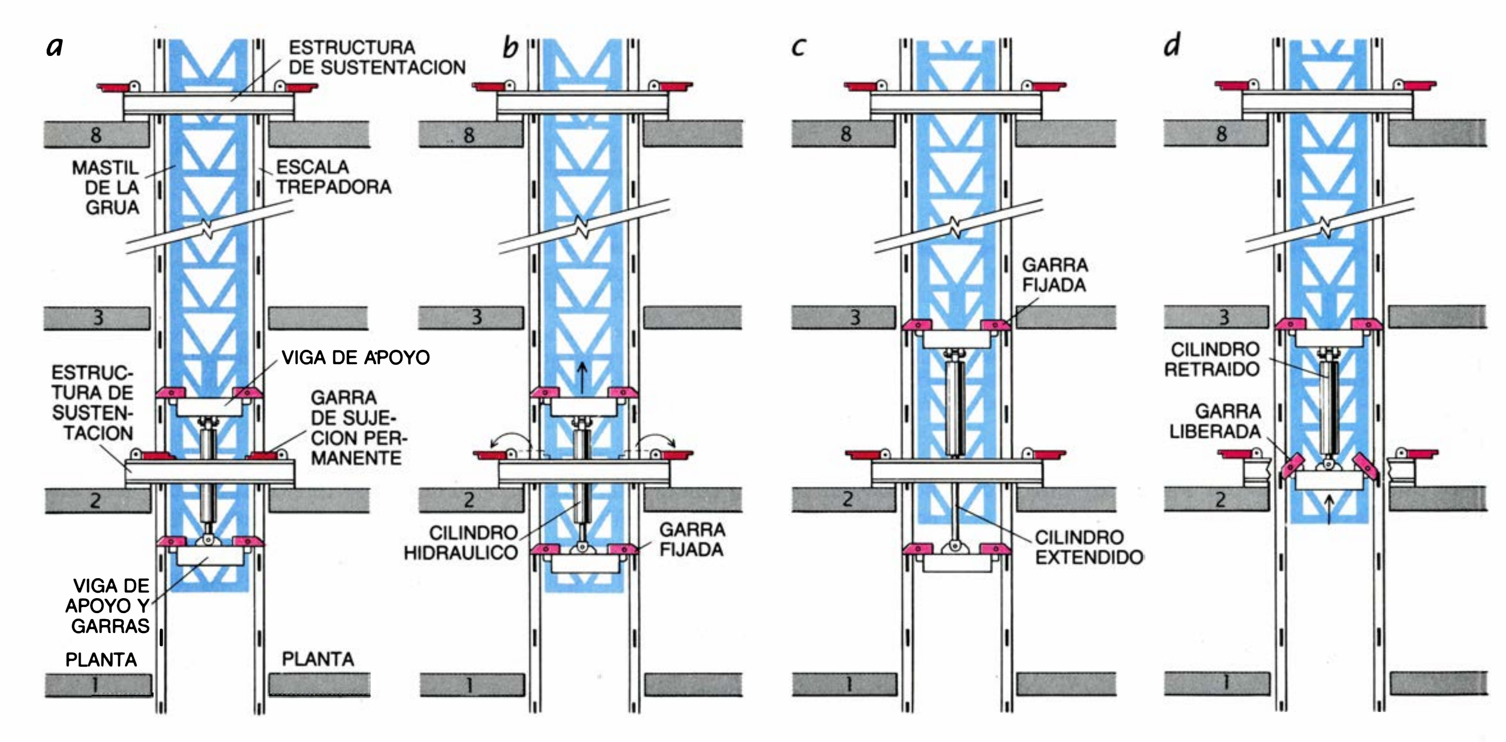
Las grúas de torre varían algo según el país de origen. Las que se fabrican en Europa están movidas por motores eléctricos con controles de aceleración y velocidad paso a paso; poseen también refinados mecanismos de frenado. Ajustándose a las preferencias locales, los fabricantes de grúas norteamericanos y australianos producen en su mayoría máquinas impulsadas hidráulicamente y alimentadas por motores diesel. En todos los casos, sin embargo, las grúas de torre se hallan equipadas con múltiples dispositivos de seguridad: desde frenos a prueba de fallo que se accionan automáticamente en caso de un mal funcionamiento del sistema de impulsión hasta limitadores de velocidad y sobrecarga para protección frente a un manejo imprudente. Una grúa de torre con limitadores ajustados, por ejemplo, no transportará cargas excesivas de complicado manejo. Además, las palancas del operario son interruptores de estado neutro: si se sueltan, vuelven al punto muerto y los frenos se accionan de manera automática.

El observador de un paisaje urbano distinguirá dos tipos de grúa de torre: las que tienen aguilones que se proyectan con un ángulo por encima de la horizontal y aquellas cuyos aguilones son horizontales. El primer tipo se llama grúa de aguilón abatible; el segundo, grúa de torre horizontal. Una grúa de torre de aguilón abatible proyecta un ángulo respecto a la vertical que se modifica para producir el movimiento radial del gancho. El tipo horizontal está equipado con un carro en la parte inferior del aguilón para desplazar el gancho hacia delante y hacia atrás. Sin embargo, y debido a que este tipo horizontal no puede elevarse, sólo puede utilizarse cuando no hay obstáculos, como edificios adyacentes, que impiden el giro del aguilón. Por esa razón, se prefieren las grúas de aguilón abatible en obras congestionadas o en aquellas donde trabajan simultáneamente varias grúas. En la ciudad de Nueva York, por citar un ejemplo, las grúas de aguilón abatible sobrepasan a las horizontales.

Selección de la grúa correcta

Al seleccionar una grúa debe tenerse en cuenta el tipo de edificio que se construye. Los rascacielos actuales se agrupan en dos tipos: los de estructura de acero y los de estructura de hormigón.

Los edificios con estructura de acero están formados por piezas de peso muy variable. Las secciones de columnas de ocho metros en la base de un edificio de 50 pisos pueden pesar 25 toneladas cada una y sólo una tonelada las de la parte superior. Además, las limitaciones del espacio urbano son tan apremiantes que los ingenieros de estructuras deben crear a veces inmensas vigas para soportar el peso de un edificio sobre un vestíbulo, una sala de reuniones o incluso un edificio adyacente. Estos elementos pueden pesar más de 100



6. **LAS GRUAS QUE TREPAN POR EL INTERIOR DEL EDIFICIO se elevan por sí mismas mediante sistemas de escalonamiento hidráulico. Este dibujo, muy esquemático, muestra un escala de trepado en una sección del mástil de la grúa. La máquina trepa por los largueros de la escala que se hallan sujetos en una estructura de sustentación. De manera alternativa se extiende y se retrae un cilindro hidráulico que posee una viga de apoyo equipada con un par de garras en cada extremo. Cuando la grúa está funcionando (*a*), el cilindro y ambos conjuntos de garras se retraen y el peso de la grúa se soporta en las garras de sujeción permanente cerca de su base. Al comenzar el levantamiento de la grúa, el cilindro se extiende parcialmente por presión hidráulica (*b*); las garras inferiores se fijan en los largueros de la escala, transfiriendo a ésta el peso de la grúa, y se retiran las garras de sujeción permanente. En el siguiente paso (*c*) se extiende**

toneladas cada uno y necesitar dos grúas que trabajen en sincronía para elevarlos hasta que se coloquen en su sitio. Además, todos los componentes de un edificio con estructura de acero deben clasificarse y controlarse durante el proceso de construcción. Esto implica que sean "removidos" cuando llegan a la obra para poder identificar cada pieza marcada. En las zonas urbanas donde hay limitación de espacio, el proceso de remoción se realiza en la parte superior de la obra.

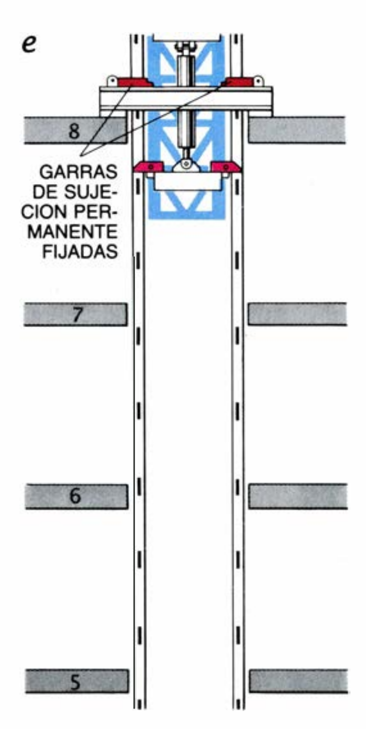
Por tanto, la selección de una grúa en una construcción con estructura de acero está determinada, entre otros parámetros, por los pesos máximos y normales que han de izarse, la facilidad de acceso al edificio de los camiones que transportan material, la ubicación del punto de remoción y la cantidad de espacio disponible para la propia grúa.

Los edificios con estructura de hormigón imponen un cuadro de limitaciones distinto. El hormigón premoldeado, común en los edificios de baja y media altura, se fabrica en otro lugar y se transporta hasta pie de obra; el proceso de construcción es similar al del acero. Para el hormigón vertido en la propia obra, un parámetro crítico es la velocidad con que puede izarse hasta la parte superior del edificio. Una torre normal de planta alta puede necesitar 190 metros cúbicos de hormigón por planta, el equivalente a 450 toneladas.

Mientras que para montar una planta de un edificio de estructura de acero pueden necesitarse 25 cargas de acero, una planta equivalente en una estructura de hormigón vertido en obra puede necesitar nada menos que 150 cargas. Si pueden eliminarse 30 segundos en el tiempo de elevación (60 segundos incluyendo el viaje de vuelta), la cantidad de tiempo que se ahorra tendrá un efecto mínimo en la carga del acero, pero se podrían ahorrar dos horas y media para cada planta de un edificio de hormigón. Cuando una planta de hormigón vertido en obra debe terminarse en dos días, lo que es normal en la ciudad de Nueva York, el beneficio del contratista depende de la velocidad del gancho.

Es corriente ver más de un tipo de grúa en una obra. En las primeras etapas de un edificio de tamaño notable puede comenzarse con una grúa de pico de pato, para sustituirla luego por una móvil mayor, que puede instalarse para transportar la pesada y compleja estructura de la base del edificio. Llegado el momento de construir las plantas más ligeras y repetitivas de la estructura superior, se instalará una grúa de torre. Puede recurrirse a grúas adicionales para acabar el exterior del edificio, ya que el plazo de entrega (u otros factores) apremia para que el proceso se termine. Los materiales que son muy ligeros de peso o compactos (ladrillos, argamasa, paneles prefabricados, ventanas, etc.) se suben en un montacargas provisional habilitado en el exterior del edificio, liberando así a las grúas para tareas más pesadas y costosas desde el punto de vista económico.

Hay muchas fuerzas que actúan simultáneamente sobre una grúa amenazando su estabilidad e induciendo tensiones. Entre ellas citaremos el peso de la carga, la presión del viento, el peso de la propia grúa y la inercia asociada con los componentes móviles de la máquina y su carga. Los efectos resultantes deben estar limitados por la resistencia estructural de la grúa y el terreno o edificio que la sustenta, pero la máquina ha de poseer también la adecuada estabilidad para resistir un vuelco. De hecho, las grúas móviles están más condicionadas por la estabilidad que por la resistencia. La máxima carga permitida se cifra entre un 75 y un 85 por 100 del levantamiento de carga que causaría el vuelco de la grúa móvil. Los proyectistas de grúas pueden maximi-



totalmente el cilindro y se fijan las garras superiores. El cilindro puede entonces retraerse (*d*), levantando la viga de apoyo inferior y liberando automáticamente las garras inferiores. Después de repetirse el ciclo varias veces, las garras de sujeción permanente se colocan en su sitio y la grúa vuelve a funcionar.

zar la capacidad de elevación de una máquina minimizando el peso del aguilón (por ejemplo, utilizando acero de alta resistencia en un aguilón reticulado para reducir el peso propio en relación con la capacidad de elevación), maximizando el contrapeso y teniendo una base lo más amplia posible.

Los contrapesos en las grúas móviles grandes llegan a pesar hasta 75 toneladas. Se fabrican en secciones desmontables y pueden transportarse al margen de la propia grúa. Cuando los contrapesos se combinan con el peso de la grúa, el motor y la maquinaria de impulsión, añaden estabilidad a la grúa. (Pero si se añade demasiado contrapeso, la grúa sin carga puede volcar hacia atrás.)

Los soportes de fijación que sobresalen de la base de una grúa sobre neumáticos aumentan su estabilidad separando el eje de vuelco del cuerpo de la máquina. La mayoría de los soportes de fijación de una grúa son unos brazos que sobresalen telescópicamente de cada lado del chasis de la máquina. Sus extremos están equipados con gatos verticales; la grúa funciona cuando los soportes se hallan desplegados del todo y ella levantada por los gatos.

El operario de la grúa móvil debe decidir atendiendo a diferentes factores: la longitud del aguilón y las características de la carga para compensar los efectos del viento y la inercia. Por ejemplo, un panel grande presenta una considerable superficie expuesta al viento y, por tanto, su carga sólo es aconsejable cuando la velocidad de éste es mínima. Cuando una grúa gira, la fuerza centrífuga proyecta la carga hacia fuera y disminuye la estabilidad; la aceleración y el frenado inducen cargas laterales en el aguilón produciendo una deflexión lateral con el aumento correspondiente de tensiones.

Las grúas de torre tienen límites automáticos impuestos sobre su velocidad rotacional y aceleración para controlar los efectos de la inercia; los operarios de grúas móviles, por otro lado, deben ejercer ese control por sí mismos, pero las grúas de torre son más sensibles al viento debido a su posición fija. Cuando se producen fuertes tormentas, los aguilones de las grúas móviles se rebajan de la zona de peligro, pero los de las grúas de torre permanecen en su posición y soportan el fragor de la tormenta. Ello obliga a diseñar las grúas de torre para que soporten la embestida de un huracán. Cuando estalla la tormenta, el procedimiento usual es dejar que el aguilón gire con libertad, presentando así la mínima resistencia y superficie al viento. En los días que el viento supera los 50 kilómetros por hora, todas las grúas dejan de trabajar, aunque la mayoría de las grúas de torre están diseñadas para soportar vientos más fuertes mientras trabajan.

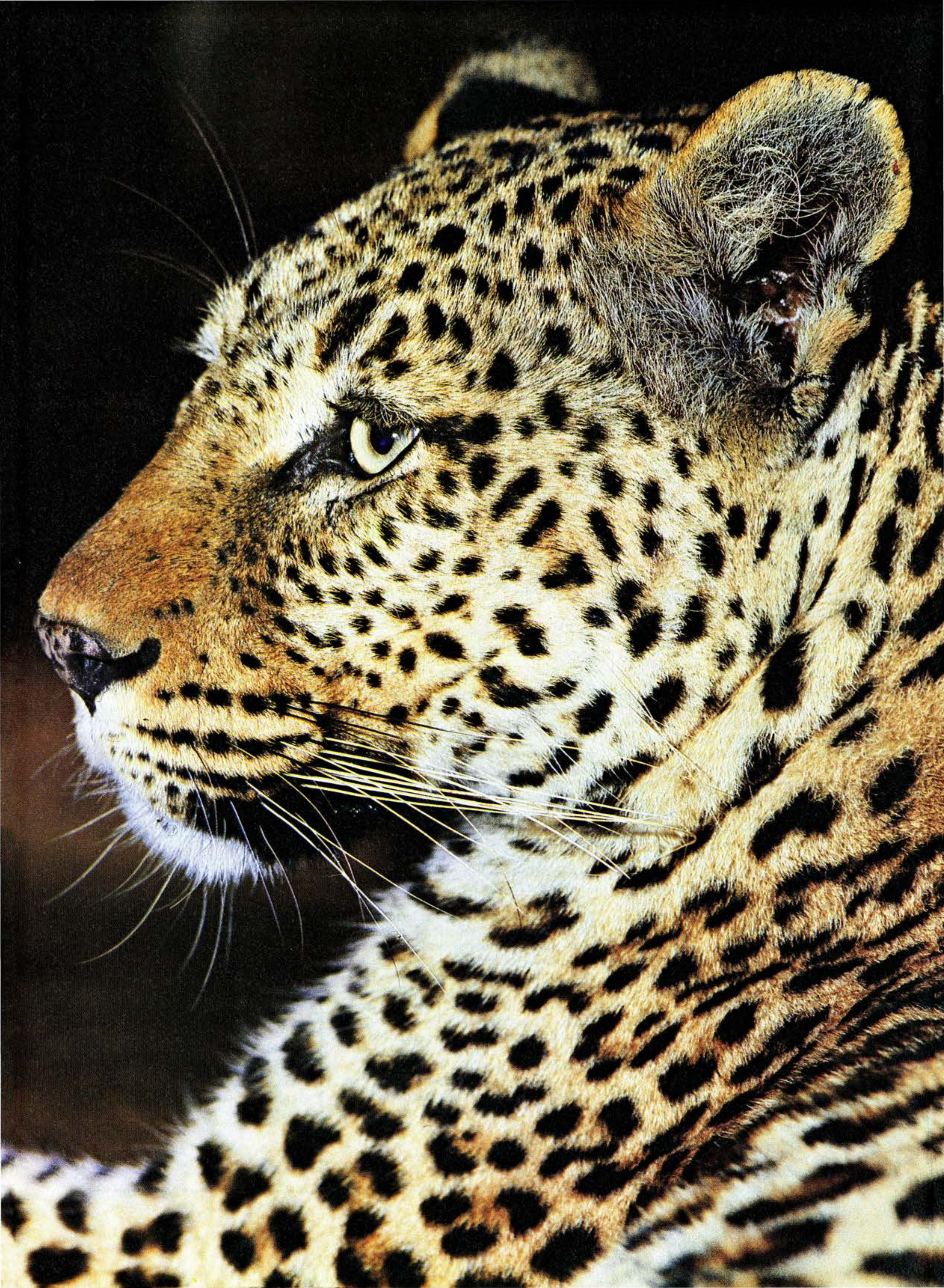
Seguridad de las grúas

Los accidentes de grúas en obras urbanas pueden ser dramáticos, y son seguidos a menudo por protestas ante la indefensión del público. Una grúa que pierde el control de su carga o vuelca puede crear pánico en las calles; a veces incluso mutilando o matando a transeúntes. Los riesgos para los trabajadores de la construcción son incluso mayores: la albañilería es una ocupación peligrosa y, el gobierno de la grúa, uno de sus mayores peligros. ¿Qué hacer para mejorar la situación?

La mayoría de los accidentes graves de grúas están causados por sobrecarga, mal uso del equipo, desgaste excesivo o deterioro de los cables de carga y montaje y desmantelamiento incorrectos (especialmente en el caso de las grúas de torre). Un número menor, aunque importante de desastres se produce por fallo de la sustentación, mantenimiento inadecuado y colisión entre el aguilón y otro objeto. La mayoría de estos accidentes podrían prevenirse mediante programas de entrenamiento para albañiles, operarios de grúa y personal supervisor.

En el fondo de muchos accidentes de grúa, sin embargo, hay errores cometidos en la etapa de planificación. La seguridad se pone en peligro cuando la grúa se coloca incorrectamente o no es la adecuada para el trabajo. Abundan los ejemplos de operarios que han hecho esfuerzos heroicos para compensar esos inconvenientes. Sus esfuerzos merecen el aplauso, pero deben condenarse los errores de planificación que llevaron a la elección equivocada de la grúa. Los núcleos urbanos muy densos llevan aparejado ese alto riesgo potencial para sus ciudadanos; por ello, los ingenieros deberían intervenir en la decisión del lugar de asentamiento, planificación de las operaciones de carga y selección de la máquina idónea para un trabajo determinado.

Los riesgos no se suprimirán nunca del funcionamiento de una grúa (o de cualquier operación en que influyan las decisiones humanas), pero sí pueden rebajarse. Las autoridades locales han de reforzar las medidas de seguridad y se han de escoger las personas expertas para el despliegue y operación de las grúas.



Las manchas del leopardo

Un mismo mecanismo de formación de pautas podría explicar la amplia variedad de pelajes de los mamíferos. Los resultados de ese modelo matemático abren nuevas perspectivas de investigación a los biólogos

James D. Murray

Los mamíferos muestran una amplia variedad de pelajes, lo que ha suscitado una diversidad comparable de explicaciones, muchas de ellas tan convincentes como la expuesta en el delicioso libro de Rudyard Kipling "How the Leopard Got Its Spots" ("Cómo adquirió sus manchas el leopardo"). Aunque la generación de los tipos de pelaje está sometida a control genético, se ignora qué mecanismos en particular dan lugar a los distintos motivos. Desde el punto de vista evolutivo y de la biología del desarrollo, resultaría de especial interés el que un mismo mecanismo diera cuenta de la enorme variedad de pelajes que se encuentran en la naturaleza.

La hipótesis que postulo es, precisamente, que un único mecanismo de formación de pautas da razón de la mayoría, si no de todos, los dibujos observados. En este artículo describiré un modelo matemático sencillo de generación de pautas en el curso del desarrollo embrionario. Una importante característica del modelo es que las pautas que genera guardan un notable parecido con los motivos de un amplio conjunto de animales: leopardo, guepardo, jaguar, cebra y jirafa. El modelo también resulta coherente con la observación según la cual, aunque la distribución de manchas en los felinos y de rayas en las cebras varía ampliamente, siendo exclusiva de cada individuo, cada clase de distribución se ajusta a un tema general. Además, el modelo predice también que los motivos sólo pueden tomar ciertas formas, lo que implica la existencia de límites en el desarrollo y sugiere una posible evolución de los diversos tipos de pelaje.

No se conoce en detalle qué es lo que determina, durante el desarrollo embrionario, la aparición de las pautas. Se habla de varios mecanismos para explicarlo. El atractivo del modelo más sencillo reside en su riqueza matemática y en su asombrosa capacidad para generar dibujos semejantes a los observados en la naturaleza. Ojalá moviera a los experimentadores a plantearse preguntas pertinentes que, en último término, sirvieran para aclarar la naturaleza del mecanismo biológico.

1. LEOPARDO descansando. ¿Se ajusta la pauta de sus manchas a reglas matemáticas y genéticas?

Se conocen algunos aspectos del desarrollo del pelaje. Físicamente, las manchas corresponden a regiones de pelo de distinto color. Este último viene determinado por la existencia de ciertas células pigmentadas, llamadas melanocitos, que se encuentran en la capa basal, o más profunda, de la epidermis. Los melanocitos producen el pigmento melanina que posteriormente pasa al pelo. En los mamíferos, existen sólo dos tipos principales de melanina: eumelanina, del griego *eu* (bueno) y *melas* (negro), que da lugar a pelo negro o castaño, y feomelanina, de *phaeos* (ceniciento), que origina pelo amarillo o naranja-rojizo.

Que los melanocitos produzcan o no melanina depende, así se cree, de la presencia o ausencia de activadores e inhibidores químicos. Ignoramos la naturaleza de esos compuestos, si bien se admite que cada tipo de pelaje refleja una pauta previa subyacente de índole química. Tal pauta previa, de existir, se encontraría en la propia epidermis o debajo mismo de ella. A los melanocitos les correspondería "interpretar" dicha pauta. El modelo que describiré pretende explicar la generación de la pauta previa.

Mi trabajo se basa en un modelo desarrollado por Alan M. Turing (el inventor de la máquina de Turing y fundador de la moderna ciencia de la computación). En 1952, en uno de los más importantes artículos sobre biología teórica, Turing postuló un mecanismo químico de generación de tipos de pelaje. Sugirió que la forma biológica reflejaba una pauta previa de concentraciones de ciertos compuestos químicos llamados morfógenos. La existencia de los morfógenos sigue siendo en gran parte hipotética, salvo por alguna prueba circunstancial, pero el modelo de Turing no ha perdido atractivo, pues parece explicar gran número de resultados experimentales aplicando sólo uno o dos conceptos sencillos.

Turing partió del supuesto de que los morfógenos pueden reaccionar entre sí y difundirse a través de las células. Aplicó seguidamente un modelo matemático para demostrar que, si los morfógenos reaccionan y se difunden convenientemente, pueden aparecer pautas espaciales de concentraciones de tales reactivos a partir de una distribución inicial uniforme. Del modelo de Turing han derivado otros muchos: los modelos de difusión-reacción. Son aplicables siempre que el tamaño de la pauta sea muy grande en comparación con el diámetro de las células. Así, por ejemplo, pueden aplicarse al pelaje del leopardo, pues el número de células de cada mancha es de unas 100 en el momento de establecerse la pauta.

El trabajo inicial de Turing ha sido desarrollado por numerosos investigadores, el autor incluido, en una teoría matemática más amplia. En un modelo típico de difusión-reacción, se parte de dos morfógenos, capaces de reaccionar entre sí y de difundirse con velocidades distintas. En ausencia de difusión —por ejemplo, en una reacción que transcurra en un medio con muy buena agitación— los dos morfógenos reaccionarían y alcanzarían un estado estacionario uniforme. Si se permite entonces que los morfógenos se difundan con la misma velocidad, cualquier desviación espacial respecto del estado estacionario acabará desapareciendo. Pero si las velocidades no son iguales, la difusión puede resultar desestabilizadora; en un

punto cualquiera, las velocidades de reacción no serían capaces de ajustarse con la suficiente rapidez para alcanzar el equilibrio. Si las condiciones son las adecuadas, la pequeña alteración inicial puede originar una inestabilidad que se traduzca en la formación de una pauta. Se trataría de una desestabilización guiada por difusión.

En los modelos de difusión-reacción se supone que uno de los morfógenos es un activador, que induce a los melanocitos a elaborar una clase de melanina, por ejemplo la negra, y el otro es un inhibidor que impide su producción. Supongamos que las reacciones ocurren de tal forma que el activador aumenta su concentración localmente y genera simultáneamente el inhibidor. Si éste se difunde antes que el activador, se originará una isla con una alta concentración de activador rodeada de una región con una alta concentración de inhibidor.

El siguiente ejemplo, aunque alejado de la realidad, facilitará la interpretación del proceso mediante el cual el mecanismo activador-inhibidor puede generar pautas espaciales de concentraciones de morfógenos. Sea un bosque muy seco, presa fácil de incendios. Para minimizar los posibles daños, se distribuyen por el mismo bomberos dotados de helicópteros y de equipo apagafuegos. Imaginemos ahora que comienza a arder (el activador) en un punto dado. El frente de llamas se expande. En un principio no hay en las cercanías suficientes bomberos (los inhibidores) para apagarlo. Sin embargo, deplazándose con los helicópteros, logran adelantarse al frente y rociar los árboles con productos químicos ignífugos; cuando el fuego alcanza esos árboles, se extingue y el frente de llamas se detiene.

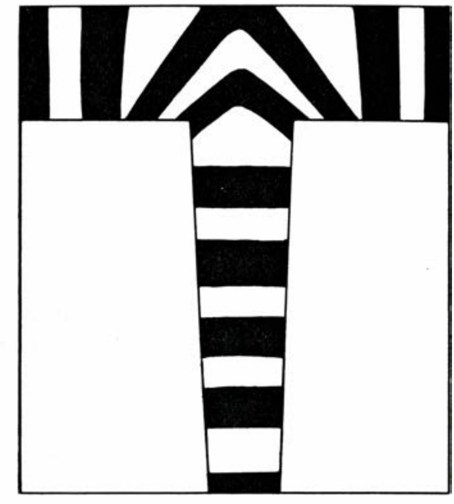
Si el fuego se inicia espontáneamente en puntos del bosque distribuidos al azar, con el transcurso del tiempo se propagarán varios frentes de fuego (ondas de activación). Cada vez que aparece uno nuevo, los bomberos (ondas de inhibición) deben volar más rápidamente para atajar el fuego a cierta distancia del foco. El resultado final es un bosque con manchas negruzcas de árboles quemados, alternadas con manchas verdes de árboles indemnes. En efecto, el resultado remeda el obtenido por los mecanismos de difusión-reacción guiados por difusión. El tipo de pauta que surge, dependiente de los distintos parámetros del modelo, está al alcance del análisis matemático.

Se han propuesto muchos modelos específicos de difusión-reacción, basados en reacciones bioquímicas reales o plausibles; se ha examinado también su capacidad para generar pautas. En esos mecanismos están implicados varios parámetros: velocidades de reacción, de difusión de los distintos reactivos y, algo que es de vital importancia, la geometría y el tamaño del tejido. El resultado obtenido, partiendo de un estado estacionario uniforme en el que se mantienen constantes todos los parámetros menos uno, ejemplifica una de las fascinantes propiedades de los modelos de difusión-reacción. Suponga-



2. UN MODELO MATEMATICO genera pautas muy parecidas a las de ciertos animales. Se muestran los motivos de la cola del leopardo (*izquierda*), jaguar y guepardo (*centro*) y gineta (*derecha*), junto con las pautas derivadas del modelo de cilindros que se estrechan progresivamente (*en cada dibujo, a la derecha*).





3. LISTAS DE LA CEBRA en la unión de la pata delantera y el cuerpo (*izquierda*); podrían aparecer por medio de un mecanismo de difusión-reacción.

mos en particular que se aumenta el tamaño del tejido. Con el tiempo, se alcanza un punto crítico, el valor de bifurcación, donde el estado estacionario de los morfógenos se desestabiliza y empiezan a crearse pautas espaciales.

Los ejemplos visualmente más espectaculares de formación de pautas de difusión-reacción son cierta clase de reacciones químicas que provocan cambios de color, descubiertas por los soviéticos B. P. Belousov y A. M. Zhabotinsky a finales de la década de 1950 [véase "Termodinámica de la evolución biológica", por David Lurié y Jorge Wagensberg; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, marzo de 1979]. Las reacciones se organizan en el espacio y en el tiempo, por ejemplo en ondas espirales. Pueden oscilar con precisión cronométrica, cambiando, por ejemplo, de azul a naranja y viceversa dos veces por minuto.

Otro ejemplo de pautas naturales de difusión-reacción lo descubrió y estudió el químico francés Daniel Thomas en 1975. Las pautas aparecen al reaccionar el ácido úrico con el oxígeno sobre una membrana delgada en cuyo interior pueden difundirse los reactivos. Aunque la membrana contiene, inmovilizada, una enzima que cataliza la reacción, el modelo empírico capaz de describir el mecanismo sólo tiene en cuenta los dos primeros reactivos, ignorando la enzima. Además, ante el carácter laminar de la membrana, puede admitirse, correctamente, que el mecanismo tiene lugar en un espacio bidimensional.

En mi opinión, un buen candidato a mecanismo universal de generación de la pauta previa para la formación del pelaje en los mamíferos sería aquel sistema de difusión-reacción que originase pautas espaciales guiadas por difusión. Tales pautas dependen mucho de la geometría y tamaño de la zona donde se desarrolla la reacción. En consecuencia, el tamaño y la forma del embrión en el momento de iniciarse las reacciones podrían determinar los tipos de pautas espaciales que habrán de formarse. (El crecimiento posterior puede distorsionar las pautas iniciales.)

Cualquier mecanismo de difusión-reacción capaz de generar pautas espaciales guiadas por difusión podría constituir un modelo plausible de los diferentes tipos de pelaje animal. Los resultados numéricos que presento aquí están basados en el modelo derivado de los trabajos de Thomas. Dando a los parámetros valores típicos, el tiempo necesario para formarse las pautas durante la embriogénesis sería del orden de un día.

Curiosamente, el problema matemático de describir las etapas iniciales de la formación de las pautas espaciales mediante mecanismos de difusión-reacción (cuando las desviaciones de la uniformidad son pequeñas) resulta similar al de describir la vibración de láminas delgadas o de la membrana de un timbal. Por tanto, puede estudiarse la dependencia del crecimiento de la pauta respecto de la geometría y del tamaño analizando las vibraciones que se producen en la superficie, análoga, de un timbal.

Si la superficie es muy pequeña, no sustentará las vibraciones y las perturbaciones cesarán rápidamente. Para que perdure una vibración se precisa, pues, un tamaño mínimo. Supongamos que la membrana del tambor, que se correspondería con la zona donde se registran los procesos de difusión-reacción, sea un rectángulo. A medida que se incrementa su tamaño, surge una serie de tipos de vibraciones de complejidad creciente.

Ejemplo importante de cómo la geometría limita los posibles modos de vibración es el caso del proceso que ocurre en una zona tan estrecha que sólo pueden registrarse vibraciones simples, esencialmente unidimensionales. Las pautas bidimensionales genuinas precisan que la zona, además de larga, sea ancha. El requerimiento análogo para las vibraciones sobre la superficie de un cilindro es que el radio no puede ser demasiado pequeño; en caso contrario, aparecerían sólo tipos casi unidimensionales; es decir, sólo podrían formarse pautas anulares (rayas). Ahora bien, con un radio suficiente se dibujan sobre la superficie pautas bidimensionales (manchas). En consecuencia, un cilindro que se estreche paulatinamente mostrará una gradación de las pautas bidimensionales (con manchas) a las unidimensionales (con rayas) [*véase la figura 2*].

Volviendo al mecanismo real de difusión-reacción con dos morfógenos que elegí, opté por un conjunto de parámetros de reacción y difusión capaz de provocar una inestabilidad guiada por difusión y lo mantuve constante durante todos los cálculos. Varié sólo el tamaño y la geometría del dominio en consideración. Como condiciones iniciales para mis cálculos, efectuados mediante ordenador, escogí perturbaciones aleatorias del estado estacionario uniforme. En las pautas resultantes, se



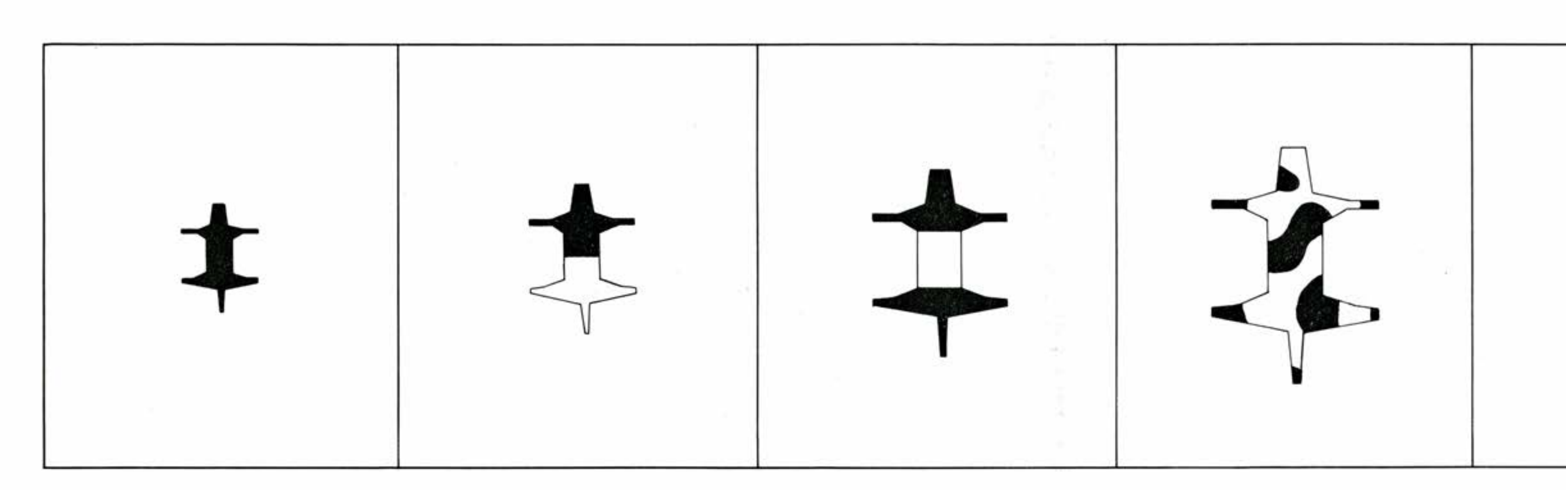
4. EJEMPLOS DE PAUTAS MUY ESPECTACULARES: oso hormiguero (*izquierda*) y cabra de Valais, *Capra aegagrus hircus* (*derecha*). Puede explicarse la aparición de esas pautas merced al mecanismo de difusión-reacción de activadores e inhibidores que propone el autor [*véase la figura 5*]. Al crecer el ta-

coloreaban en tonos oscuros o claros las regiones donde la concentración de uno de los morfógenos era mayor o menor que la correspondiente al estado estacionario homogéneo. Incluso imponiendo tales limitaciones a los parámetros y a las condiciones iniciales, era admirable la riqueza de las pautas.

¿Hasta que punto los resultados del modelo se ajustaban a las características generales del pelaje animal? Por modelos de las pautas que siguen colas y patas comencé utilizando cilindros que se estrechaban paulatinamente. Los resultados remedan a los que se obtienen con láminas en vibración; a saber, si se adelgaza una región bidimensional portadora de manchas, éstas se convierten en rayas.

El leopardo (*Panthera pardus*), el guepardo (*Acinonyx jubatus*), el jaguar (*Panthera onca*) y la gineta (*Genetta genetta*) son buenos ejemplos de ese tipo de modelo. Las manchas del leopardo alcanzan casi la punta de la cola. En las colas del guepardo y del jaguar aparecen algunas zonas rayadas y la de la gineta es totalmente rayada. Estas observaciones resultan coherentes con lo que se conoce acerca de la estructura embrionaria de esos cuatro animales. La cola prenatal del leopardo se estrecha bruscamente y es bastante corta, por lo que resulta previsible que presentase manchas hasta casi el final. (La cola del leopardo adulto, aunque es larga, presenta el mismo número de vértebras.) En el extremo opuesto, la cola del embrión de la gineta tiene un diámetro uniforme y es bastante delgada. Por tanto, no cabe esperar que la cola de la gineta sea manchada.

El modelo proporciona también un ejemplo de una limitación del desarro-



5. EL TAMAÑO AFECTA A LAS PAUTAS que pueden generarse dentro de los límites impuestos por la forma genérica de animal, según propone el modelo del autor. Aumentando el tamaño y manteniendo constantes los demás parámetros, aparece una amplia variedad de pautas. El modelo está de acuerdo con



maño del dominio, también lo hace la complejidad de la pauta. El dibujo del oso hormiguero lo publicaron originalmente G. y W. B. Whittaker en febrero de 1824, y la fotografía es de Avi Baron y Paul Munro.

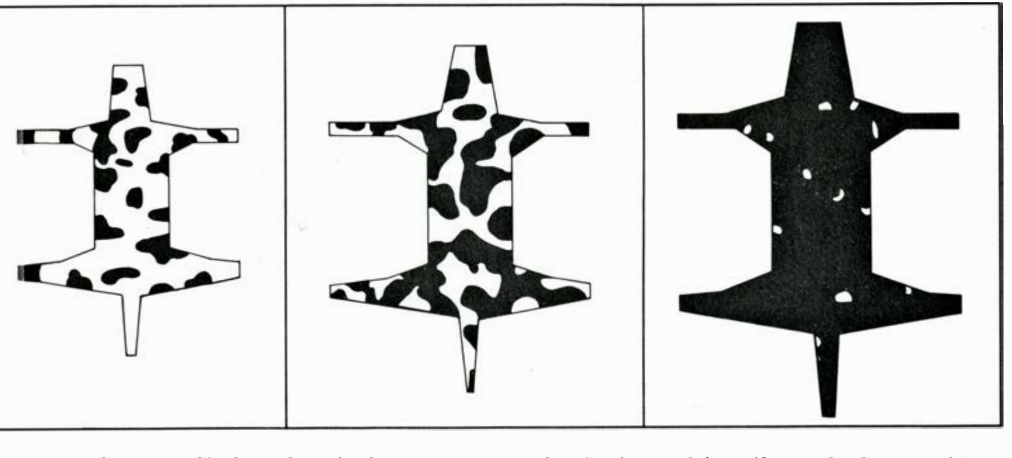
llo de la que existen pocos casos documentados. Si el mecanismo de aparición de pautas previas a la formación del pelaje en los animales es un proceso de difusión-reacción (o cualquier otro proceso dependiente del tamaño y la geometría), la limitación procedería del tamaño y geometría de los embriones. Según este mecanismo es posible que un animal con manchas tenga la cola a rayas, e imposible que un animal a rayas tenga la cola manchada.

Hemos conseguido también explicar el dibujo rayado de las cebras. Nuestro mecanismo lo genera sin especial dificultad. Más complicada es la pauta en el punto de unión de la pata delantera al cuerpo, pero el modelo matemático predice justamente la formación del rayado típico que se observa en dicha zona [*véase la figura 3*].

Para estudiar la influencia del efecto de escala en una geometría más compleja, calculamos los motivos que podrían aparecer sobre una forma genérica de animal, compuesta de cuerpo, cabeza, cuatro extremidades y cola [*véase la figura 5*]. Partimos de una forma muy pequeña y fuimos incrementando gradualmente su tamaño, procurando mantener las proporciones entre las partes. Varios resultados nos llamaron la atención. Cuando el dominio era muy pequeño, no se generaba ninguna pauta. A medida que aumentaba el tamaño, se producían bifurcaciones sucesivas: aparecían y desaparecían bruscamente distintas pautas; con dicho aumento también, las pautas exhibían una estructura más compleja y presentaban más manchas. Sin embargo, en las extremidades delgadas seguían conservándose las rayas, incluso en los dominios bastante grandes. Cuando se alcanzaban tamaños muy grandes, la estructura de la pauta adquiría tal complejidad que el pelaje se tornaba de nuevo uniforme.

Los efectos de escala sugieren que, si el modelo de difusión-reacción es correcto, resulta crítico el momento exacto en el que se activa el mecanismo de formación de la pauta. Se está aquí admitiendo implícitamente que las constantes y los coeficientes de difusión que intervienen en el mecanismo son bastante similares en distintos animales. Si el mecanismo se activa en una fase temprana del desarrollo, mediante la conmutación de un gen, por ejemplo, la mayoría de los animales pequeños que posean períodos de gestación cortos presentarán un pelaje uniforme. Lo que suele ocurrir. Si las superficies son mayores en el momento de la activación, existe la posibilidad de que los animales sean la mitad blancos y la mitad negros. La melívora (*Mellivora capensis*) y la cabra de Valais (*Capra aegagrus hircus*), de coloración espectacular, constituyen dos buenos ejemplos de ello [*véase la figura 4*]. A medida que crece el tamaño del dominio, también lo hará la complejidad de la pauta. De hecho, se aprecia un incremento de complejidad desde la cabra de Valais hasta ciertos osos hormigueros, y de estos a la cebra, el leopardo y el guepardo. En el extremo superior de la escala de tamaños, las manchas de las jirafas presentan una distribución muy apretada. Finalmente, los animales muy grandes deben tener de nuevo una piel uniforme, y así sucede en el elefante, el rinoceronte y el hipopótamo.

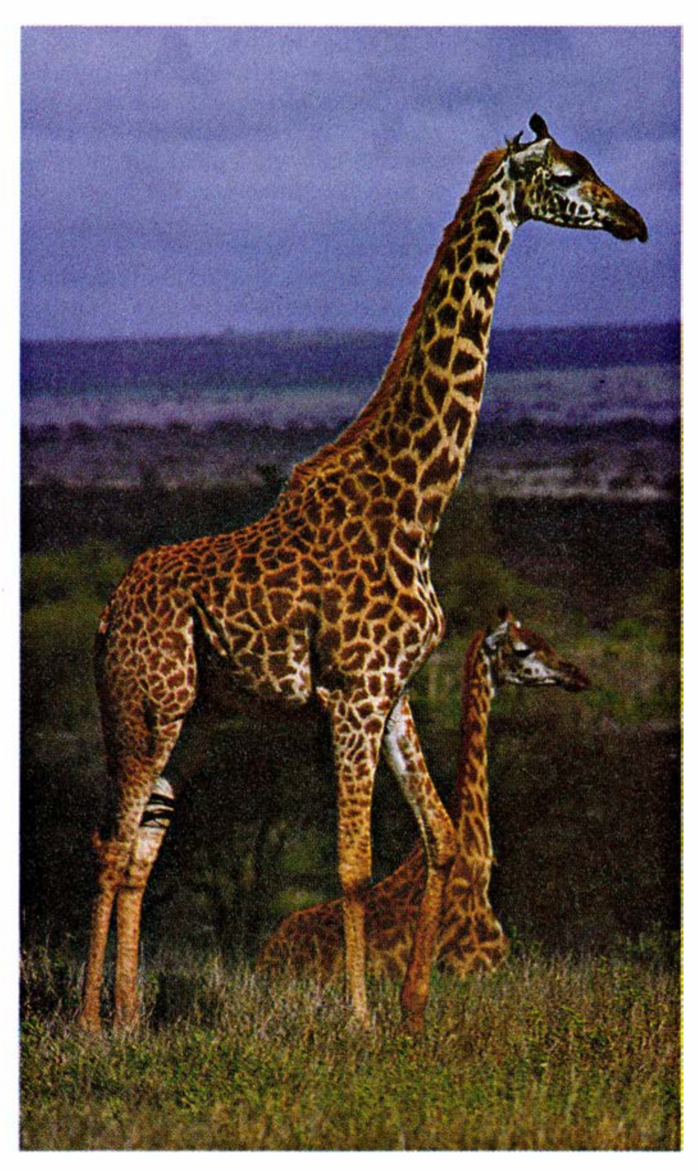
Suponemos que el momento preciso de activación del mecanismo de formación de la pauta es un carácter congénito; y así, al menos en los animales cuya supervivencia depende en gran medida de la complejidad de la pauta, el mecanismo se activa cuando el embrión alcanza cierto tamaño. El estado de la superficie del embrión en el momento de la activación está sujeto, es

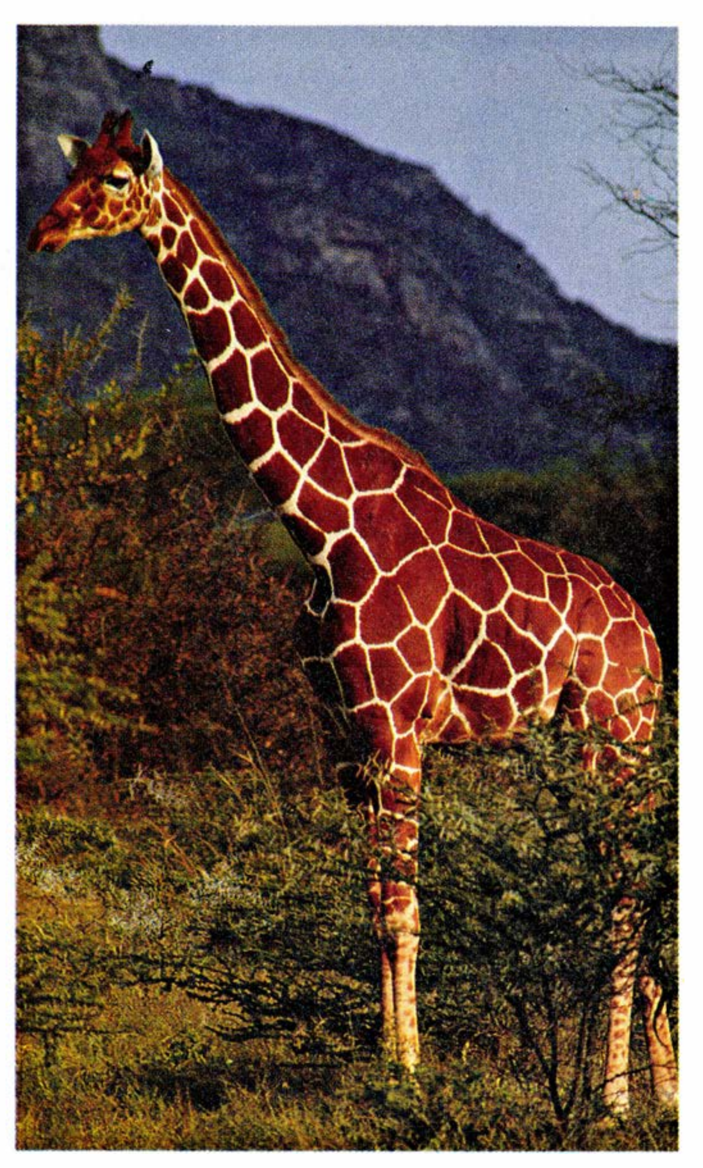


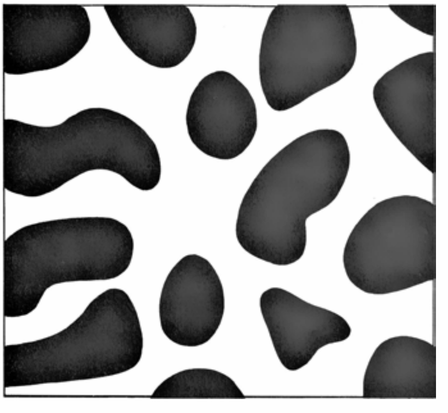
la observación de que los animales pequeños, como el ratón, tienen pelajes uniformes, los de tamaño intermedio, como el leopardo, los tienen manchados y los grandes, como el elefante, los presentan uniformes.

obvio, a cierta aleatoriedad. El modelo de difusión-reacción genera pautas que dependen únicamente de las condiciones iniciales, de la geometría y del tamaño. Aspecto importante del mecanismo es el siguiente: dada una particular geometría y tamaño, las pautas generadas por las variaciones aleatorias de las condiciones iniciales resultan cualitativamente similares. En el caso de un dibujo manchado, por ejemplo, sólo cambia la distribución de las manchas. Este hallazgo es coherente con la individualidad que muestran los tipos de pelaje dentro de una especie. Tal individualidad permite el reconocimiento entre parientes y, en general, entre grupos.

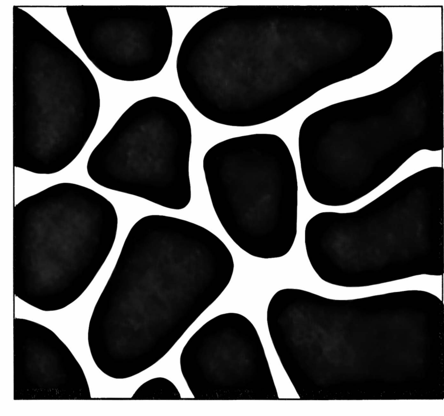
Según se cree, los motivos generados por el modelo corresponden a pautas espaciales de las concentraciones de morfógenos. Con una concentración alta, los melanocitos producirán melanina. Por mor de sencillez, hemos supuesto que el estado estacionario uniforme corresponde a la concentración umbral y, por tanto, se producirá melanina siempre que la concentración de morfógeno iguale o supere la umbral. Pero se trata de una suposición un tanto arbitraria. Es razonable esperar que la concentración umbral varíe incluso dentro de una misma especie. Para in-







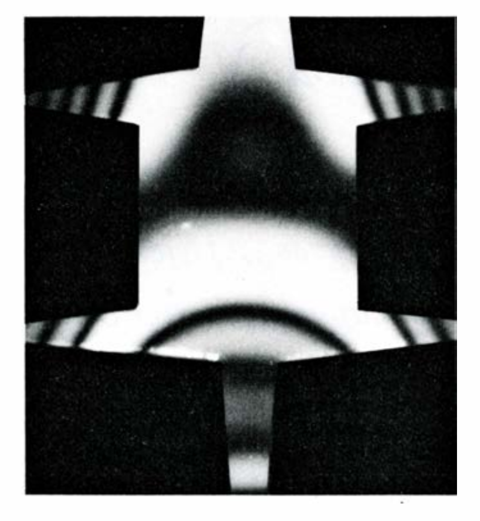
6. LOS DISTINTOS TIPOS DE JIRAFA exhiben diferentes clases de dibujos. La subespecie *Giraffa camelopardalis tippelskirchi* se caracteriza por presentar manchas pequeñas separadas por espacios amplios (*arriba, a la izquierda*); por el contrario, *G. camelopardalis reticulata* está cubierta de manchas grandes más apretadas (*arriba, a la derecha*). Ambas clases de pauta las explica el modelo de difusión-reacción del autor (*abajo, a la izquierda y a la derecha*). La suposición implícita es que la pauta se establece en el embrión entre los 35 y 45 días, cuando mide de 8 a 10 centímetros de longitud. (El período de gestación de la jirafa es de unos 457 días.)

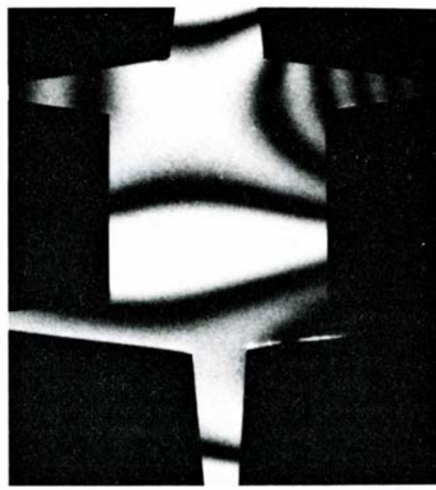


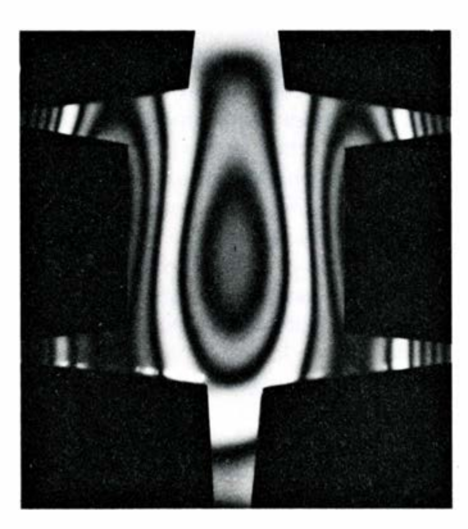
vestigar tales efectos, consideremos los distintos tipos de jirafas. Ante determinada pauta, variemos la concentración umbral de morfógeno necesaria para que se activen los melanocitos. Modificando ese parámetro pueden generarse pautas muy parecidas a las que presentan los dos tipos de jirafa [*véase la figura 6*].

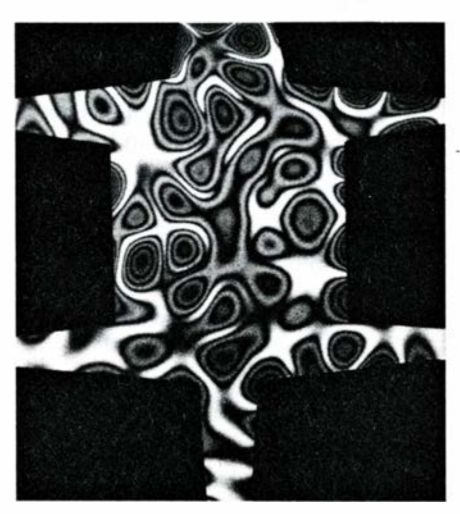
Los resultados que brinda nuestro modelo acaban de recibir una espectacular confirmación por parte de Charles M. Vest y Youren Xu, de la Universidad de Michigan, quienes generaron pautas de ondas sobre una lámina sometida a vibración. Comprobaron que la naturaleza de las pautas se alteraba al cambiar la frecuencia de vibración. Las pautas se visualizaban mediante una técnica holográfica en la que la lámina se bañaba con luz láser; la luz reflejada por la lámina entraba en interferencia con un haz de referencia, de tal modo que los máximos de las ondas se sumaban con los máximos, los mínimos con lo mínimos y los máximos de un foco anulaban los mínimos del otro. La pauta resultante se recogía sobre una emulsión fotográfica [*véase la figura 7*].

Vest y Youren encontraron que las frecuencias de vibración bajas producían pautas simples, mientras que las frecuencias altas generaban pautas complejas. La observación resulta interesante, pues se ha descubierto que las pautas creadas en una lámina que vibra con una frecuencia alta son idénticas a las que se forman sobre una lámina mayor que vibre con una frecuencia proporcionalmente inferior. En otras palabras, los datos de Vest y Youren apoyan nuestra idea de que se pueden generar pautas más complejas al aumentar la escala del dominio donde tiene lugar el proceso de difusión-reacción. El parecido entre nuestras pautas y las obtenidas por los investigadores de Michigan es notable.









7. PAUTAS DE ONDAS que aparecen sobre una lámina sometida a vibración; se asemejan a los diversos tipos de pelaje de los animales y confirman el trabajo del autor. Las pautas más complejas corresponden a frecuencias de vibración más elevadas. Los experimentos los realizaron Charles M. Vest y Youren Xu.

Me gustaría subrayar de nuevo que todas las pautas generadas se obtuvieron variando sólo el tamaño y la geometría de la zona de reacción; los demás parámetros se mantuvieron constantes (con la excepción de las concentraciones umbrales en el caso de la jirafa). Pese a ello, la diversidad de pautas es enorme. El modelo sugiere también una posible explicación para las pautas anormales que se observan en algunos animales. En ciertas circunstancias, la alteración de un parámetro determina un cambio importante de la pauta. La magnitud del efecto dependerá de la proximidad del valor del parámetro a un valor de bifurcación, es decir, a un valor en el que aparezca un cambio cualitativo de la pauta.

Si uno de los parámetros, por ejemplo una de las constantes de la cinética de reacción, varía de forma continua, el mecanismo pasa de un estado en el que no se genera ningúna pauta espacial a otro donde se forman pautas, para acabar en un tercero carente de dibujo. El que una pequeña modificación de un parámetro situado en las proximidades de algún valor de bifurcación provoque modificaciones importantes de la pauta resulta coherente con la teoría de la evolución del equilibrio puntuado, según la cual los largos períodos de escaso cambio evolutivo están interrumpidos por cortos estallidos de cambios súbitos y rápidos.

En la coloración de los animales intervienen otros muchos factores: temperatura, humedad, dieta, hormonas y distintas constantes metabólicas. Aunque los efectos de tales factores pueden simularse manipulando varios parámetros, no tiene mucho sentido entretenerse en ellos mientras no se conozca mejor el origen de las pautas que acabarán plasmando los pigmentos melánicos. Hasta entonces, no cabe sino destacar la multitud de pautas generables a partir de un modelo de difusión-reacción donde sólo se alteran el tamaño y la geometría. Resulta estimulante el considerable volumen de pruebas circunstanciales derivadas de la comparación con las pautas encontradas en los animales. Estoy convencido de que la mayoría de esas pautas pueden generarse por medio de un mecanismo de difusión-reacción. Ahora bien, que esa sencilla teoría explique muchas características generales y particulares del pelaje de los mamíferos no demuestra que sea correcta. Sólo la observación experimental puede confirmar la teoría.

Obesidad y fertilidad

La pérdida de tejido adiposo puede provocar infertilidad, reversible si se recupera grasa. ¿Ejerce ese tejido una función reguladora sobre la capacidad reproductora de la mujer?

Rose E. Frisch

Desde la edad de Piedra, los símbolos de la fertilidad femenina se han relacionado con la obesidad, especialmente de los senos, las caderas, los muslos y las nalgas: zonas donde el estrógeno, la hormona sexual femenina, favorece el almacenamiento de grasa. Esa asociación histórica entre obesidad y fertilidad posee un sentido biológico real. Más aún. Aquí defenderé la tesis de que la grasa corporal, el tejido adiposo, ejerce una acción reguladora de la función reproductora.

En los últimos 15 años se han recogido pruebas muy indicativas en ese sentido. Se sabe, por ejemplo, que la mujer debe poseer, almacenada, cierta cantidad umbral, o mínima, de grasa para empezar a tener ciclos menstruales normales y para mantenerlos y reproducirse, por tanto. Las actividades que reducen la grasa por debajo del umbral, pensemos en un régimen severo o un ejercicio intenso, pueden retrasar la edad de la menarquia (el primer ciclo menstrual) hasta los 20 años. Pérdidas de ese tipo pueden también interrumpir "silenciosamente" la ovulación –la liberación de un óvulo desde el ovario a mitad del ciclo– en una mujer que menstrúe cada mes, o desencadenar una franca amenorrea, es decir, la ausencia de ciclos menstruales. La infertilidad resultante es reversible mediante la recuperación de peso, la reducción de la actividad o ambas.

No es necesario que la mujer sufra anorexia nerviosa (un síndrome de origen psicológico que consiste en la privación voluntaria de alimento y en el que se llega a perder la tercera parte del peso corporal) para que aparezcan transtornos menstruales. Basta incluso una pérdida moderada, del orden del 10 al 15 por ciento por debajo del peso normal para la talla, principalmente por pérdida de grasa.

En estudios recientes se ha demostrado que las alteraciones menstruales asociadas con un déficit desmesurado de peso derivan de anomalías de la actividad del hipotálamo, la zona del cerebro que regula la reproducción, la ingesta de alimentos y otras funciones básicas. Desde hace mucho se sabe que el hipotálamo recibe información de centros cerebrales superiores. Por tanto, factores externos, como la temperatura y el estrés, pueden influir en la actividad reproductora del hipotálamo. Hoy resulta también evidente la incidencia de la nutrición y el esfuerzo físico.

No tiene nada de extraño que la función reproductora del hipotálamo se resienta cuando la mujer pierde demasiado peso. Una respuesta de esas características brindaría a nuestros antepasados cierta ventaja selectiva, asegurando que sólo concibieran cuando pudieran llevar a término con éxito el embarazo. Después de todo, la reproducción requiere energía, es decir, calorías: se necesitan de 50.000 a 80.000 calorías para engendrar un niño viable y, posteriormente, de 500 a 1000 calorías diarias para la lactancia. (Esas cifras superan los valores que alcanzan otros procesos vitales.) En tiempos pasados, cuando los alimentos escaseaban o su disponibilidad fluctuaba según la época del año y cuando el recién nacido se nutría exclusivamente de leche materna, la mujer que quedara embarazada sin disponer de un almacén adecuado de grasa corporal –el combustible de más fácil movilización por el organismo– expondría su vida y la del feto en desarrollo o la del recién nacido.

Cabe imaginar que las mujeres que siguieran ovulando, pese a estar mal nutridas, no traerían al mundo hijos viables o no sobrevivirían: es decir, no dejaríann descendencia. La selección natural ha ido avanzando su camino. Hoy, al llegar a la madurez, la mayoría de las mujeres tienen un almacén de grasa corporal equivalente a una cuarta parte de su peso (unos 16 kilogramos, que suponen alrededor de 144.000 calorías). Puede que la función principal de ese depósito consista en proporcionar energía para el embarazo y unos tres meses de lactancia. Por el contrario, en los hombres maduros, la grasa supone del 12 al 14 por ciento del peso. Estudios realizados con mujeres (y con hembras animales) demasiado obesas demuestran que el exceso de grasa, igual que su déficit, se acompaña de amenorrea y de infertilidad; se desconocen, sin embargo, los mecanismos responsables.

La relación entre la obesidad y la fertilidad se descubrió de manera un tanto indirecta. A principios de la década de 1970 colaboraba yo con Roger Revelle, a la sazón en la Universidad de Harvard, reuniendo datos sobre la talla, el peso y el consumo calórico de poblaciones de Iberoamérica y de Asia, para valorar las necesidades mundiales en materia de alimentación. Al analizar los datos referentes al crecimiento, advertimos que la alimentación deficiente retrasaba la edad a la que, precediendo a la menarquia, las adolescentes suelen aumentar rápidamente de peso; el aporte abundante de calorías adelantaba la edad del estirón. Ello no resultaba especialmente sorprendente, pero sí lo era otro hallazgo: en todas las poblaciones, el estirón, temprano o tardío, se daba cuando las niñas alcanzaban un peso medio similar. Es decir, el peso parecía ser el factor determinante.

Para estudiar la relación implícita entre peso y menarquia, analizamos la talla y el peso de 181 niñas cuya evolución se había seguido desde el nacimiento hasta que alcanzaban los 18 años (cuando completaban el crecimiento) en el marco de tres estudios comparables realizados en Estados Unidos. Se comprobó que tanto las niñas que maduraban pronto como las que lo hacían tardíamente tenían el mismo peso medio (de 47 kilogramos) al alcanzar la menarquia; por el contrario, la estatura media aumentaba significativamente con la edad de la menarquia.

La importancia manifiesta del peso en la aparición de la menarquia facilitó la interpretación de muchas observaciones anteriores, todavía inexplicadas. Por ejemplo, en Occidente, durante el siglo pasado, las niñas alcanzaban la menarquia cada vez más temprano. Hoy empiezan a menstruar a los 12,6 años de edad, por término medio; hace un siglo, a los 15,5 años. Revelle y yo postulamos que ese adelanto en la edad de la menarquia responde a que, en la actualidad, los niños crecen antes porque están mejor alimentados y padecen menos enfermedades. La relación entre el peso medio en la menarquia y la aparición de ésta explica también por qué la malnutrición la retrasa, por qué las gemelas (cuyo crecimiento en el útero y postnatal es relativamente lento y, por tanto, necesitan más tiempo para alcanzar el peso crítico para la menarquia) empiezan a menstruar más tarde que otras niñas de la misma población y por qué el hecho de vivir en una zona elevada sobre el nivel del mar (lo que enlentece el ritmo de crecimiento) retrasa igualmente la menarquia.

Conocer el peso medio en el momento de la primera regla no nos permitía predecir el momento de su aparición en cada niña, pues los pesos varían considerablemente a esas edades. ¿Había algún factor relacionado con el peso que facilitara esa predicción? Gordon C. Kennedy, de la Universidad de Cambridge, realizó una serie de elegantes estudios con animales que aportaron alguna luz. Kennedy descubrió que, en la rata hembra, la pubertad se relaciona mejor con el peso corporal que con la edad. Comprobó asimismo que las ratas alimentadas con dietas distintas, para alterar su ritmo de crecimiento, consumían la misma cantidad de comida por unidad de peso corporal cuando presentaban el primer estro (el equivalente de la menarquia en los animales). Sugirió que la cantidad de grasa corporal quizá regulase la señal relacionada con la alimentación y la propia aparición del estro.

Apoyada en los descubrimientos de Kennedy, en los de sus colaboradores Elsie Widdowson y Peter A. McCance y en los trabajos de Francis D. Moore y su equipo, de la Facultad de Medicina de Harvard, sobre la composición del cuerpo humano, sospeché que algún aspecto de la composición del cuerpo femenino, en particular la grasa almacenada, podría también influir sobre el momento de aparición del primer ciclo menstrual en las niñas. En consecuencia, investigué, junto con mis colegas, los cambios que se producen en la composición del cuerpo de las niñas durante el estirón de la adolescencia y al llegar a la menarquia. Examinamos, en particular, las masas grasa y magra que, en conjunto, determinan el peso corporal. La masa magra, es decir, la porción no grasa del cuerpo, comprende los músculos, la piel sin grasa, las vísceras (corazón, riñones y otros órganos) y el esqueleto.

Las 181 niñas de aquellos estudios de longitud citados más arriba habían crecido ya, pero disponíamos de los datos referentes a sus tallas y pesos en la me-

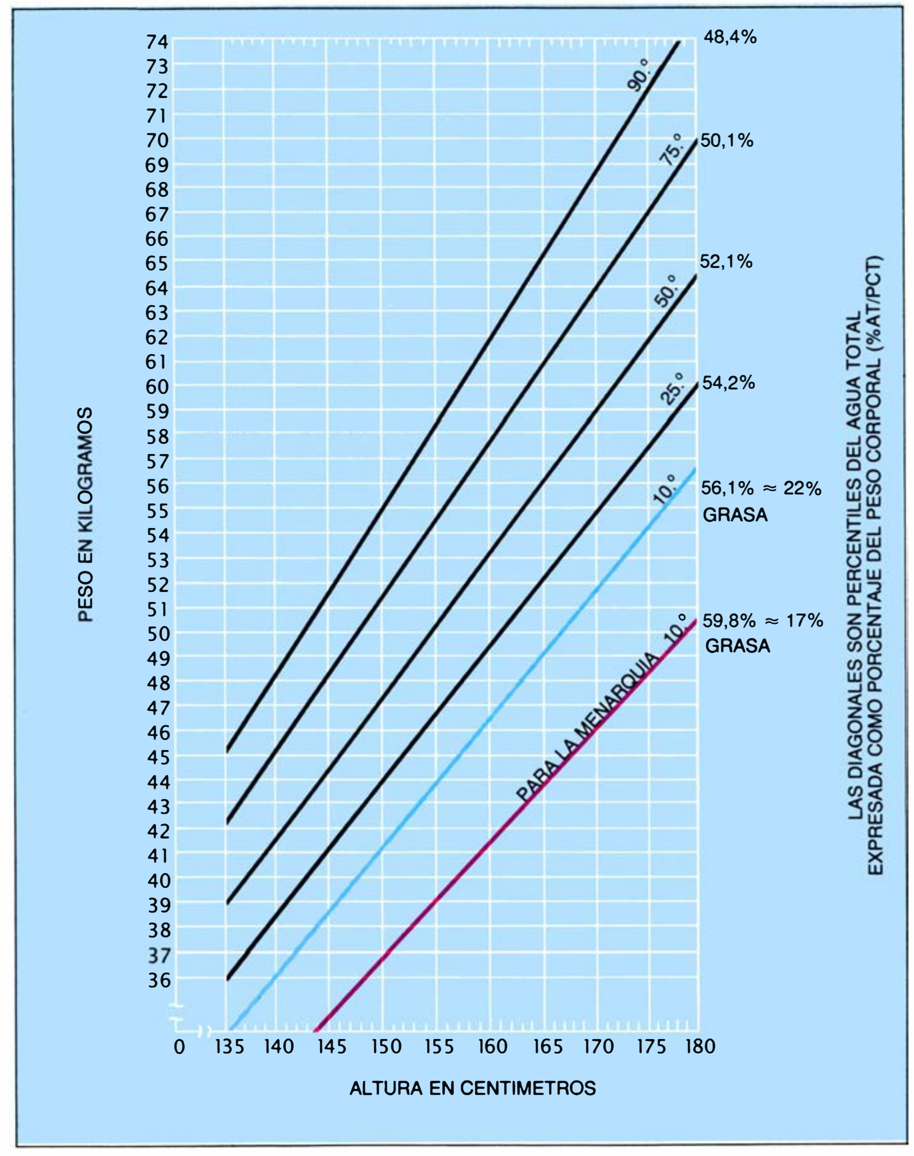


1. ESTATUILLA DE LA EDAD DE PIEDRA, la Venus de Willendorf, que representa de forma exagerada un hecho recientemente comprobado: el cuerpo de la mujer debe contener cierta cantidad mínima de grasa para reproducirse con éxito. Por regla general, esa cantidad crítica se alcanza ganando peso, pues la mayor parte de lo que emgordan los adultos no deportistas constituye, en realidad, un aumento de la cantidad de grasa almacenada. La estatuilla, descubierta en Austria, mide aproximadamente 10 centímetros de altura.

narquia y durante el estirón de la adolescencia; podía, pues, calcularse su composición corporal incluyendo esa información en ecuaciones convencionales que estiman la cantidad total de agua del cuerpo, valor que permite determinar las contribuciones relativas de la masa magra y la grasa al peso total de una persona. Las ecuaciones se basan en mediciones directas del agua corporal efectuadas en un grupo de niñas y mujeres normales.

¿De qué manera el contenido corporal en agua nos informa sobre la composición del cuerpo entero? Después de la infancia, el agua constituye el 72 por ciento de la masa magra del cuerpo. Conociendo la cantidad total de agua se determina el peso de la masa magra, que equivale al de agua dividido por 0,72. Se resta el peso de la masa magra del peso corporal total y se obtiene el peso de la grasa. El porcentaje de agua del cuerpo entero constituye un índice de obesidad. Dado que la grasa retiene poca agua (entre un 5 y un 10 por ciento), cuanta más grasa se posea, más bajo será el porcentaje de agua del cuerpo.

Descubrimos que, durante el estirón que precede a la menarquia, el principal cambio de la composición corporal estimada consistía en un gran aumento de la grasa corporal: por término medio, tanto en las niñas que maduraban pronto como en las que lo hacían tardíamente, la grasa corporal se incrementaba un 120 por ciento (de 5 a 11 kilogramos), mientras que la masa magra sólo les crecía un 44 por ciento. Por tanto, la relación entre masa magra y grasa disminuía desde aproximadamente el 5 : 1 de comienzos del estirón hasta un 3 : 1 al llegar la menarquia. Aunque difirieran en el peso, lo común en todas las niñas al llegar a la menarquia era una proporción similar entre masa magra y la grasa y un porcentaje parecido de agua respecto del peso corporal. Por término medio, durante la menarquia, el 55 por ciento del peso corporal de las niñas era agua (un "porcentaje cuerpo-agua" del 55 por ciento), que indicaba que la grasa corporal constituía, en promedio, el 24 por ciento del peso total.

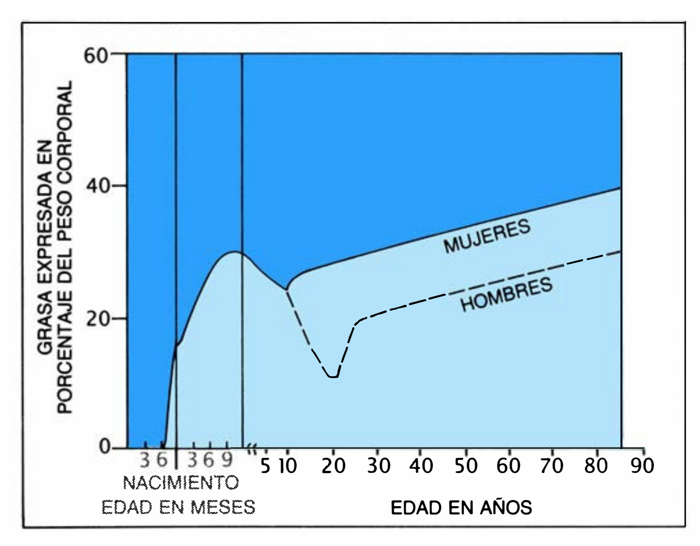


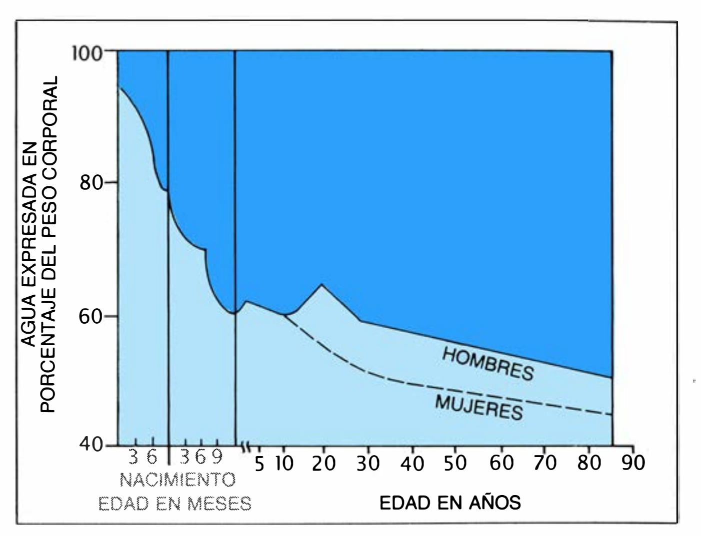
2. NOMOGRAMA que, en uso clínico, indica el peso umbral, o mínimo, que debe alcanzar una mujer que ha completado su crecimiento en altura para presentar ciclos menstruales normales. La cantidad de peso con que debe superarse ese umbral varía entre individuos y no puede predecirse. La línea roja muestra el peso mínimo necesario para llegar a la menarquia (el inicio de los ciclos menstruales). La línea azul señala el peso mínimo que corrige una amenorrea secundaria (la interrupción de la menstruación) en una mujer madura. Por ejemplo, según el nomograma, una mujer amenorreica que mida 1,65 metros de altura debe alcanzar un peso de al menos 49 kilogramos para que le reaparezca la menstruación. Las cinco líneas diagonales superiores indican los percentiles del agua total, expresada en porcentajes del peso corporal —que constituye un índice de obesidad—, para mujeres maduras, de una muestra normal, que han completado el crecimiento; la línea azul equivale al percentil 10. La línea roja representa el percentil 10 para la misma muestra en el momento de la menarquia. (La recta del percentil 50 indica el peso normal, en función de la altura, para mujeres maduras cuyas edades se hallan comprendidas entre los 18 y los 25 años.)

Los hallazgos sugerían claramente que, para menstruar, las niñas debían alcanzar una proporción umbral entre masa magra y grasa y, por consiguiente, cierto grado de obesidad. Con todo, para predecir el umbral de un individuo, no servía la proporción media de la población. Junto con Janet W. McArthur, del Hospital General de Massachusetts, abordamos el problema comparando la estatura, el peso y la composición corporal estimada de muchachas jóvenes y de mujeres que presentaban trastornos menstruales con los mismos parámetros de sujetos normales del grupo de estudio en la pubertad y a la edad de 18 años.

Comparamos los grupos por medio de tablas, los llamados nomogramas, que indicaban los pesos que, según la talla, correspondían a los niveles de obesidad relativa observados en las 181 niñas normales durante la menarquia y al finalizar el crecimiento [*véase la figura 2*]. Los niveles relativos de obesidad se indicaron en la gráfica mediante percentiles del índice de obesidad (agua total expresada como porcentaje del peso corporal).

Nos sorprendió descubrir que todos los casos de retraso de la menarquia y de amenorrea se situaban por debajo de un valor umbral de obesidad relativa. Específicamente, la comparación demostraba que, para menstruar, las niñas que habían completado el crecimiento en altura, o estaban a punto de hacerlo, debían aumentar peso para reducir el porcentaje cuerpo-agua hasta





3. PORCENTAJE DEL PESO CORPORAL representado por la grasa (*izquierda*), que aumenta con la edad en las mujeres a partir de los 10 años y, bastante más tarde, en los hombres. Esa tendencia se acompaña de un descenso del porcentaje de agua (*derecha*), ya que la grasa contiene poca, en comparación con los músculos y otras partes de la masa magra corporal. El "porcentaje cuerpo-agua" constituye, por consiguiente, un índice de obesidad. Por regla general, a los 18 años las mujeres poseen alrededor de un 28 por ciento de grasa; los hombres, un 13 por ciento. Posiblemente, ese mayor almacenamiento de grasa en las mujeres sea necesario para aportar energía durante el embarazo y la lactancia. Las gráficas se basan en datos de Bent Friis-Hansen, de Copenhagen.

el 59 por ciento. Ello aseguraría que al menos un 17 por ciento del peso lo sería de grasa (cuanto más bajo es el porcentaje cuerpo-agua, más graso es el cuerpo). El porcentaje cuerpo-agua umbral era el valor del décimo percentil de las niñas normales en la menarquia. Es decir, en el momento de la menarquia, el 90 por ciento de la muestra tenía un valor más bajo y, por tanto, se trataba de niñas más obesas. Los datos obtenidos nos llevaban a predecir que una niña de 15 años cuya estatura final fuera de 1,65 metros debería pesar al menos 44 kilogramos para menstruar.

La comparación de esos datos demostraba también que las mujeres afectas de amenorrea por déficit de peso debían superar en un 10 por ciento el umbral de menarquia para restaurar y mantener los ciclos ovulatorios normales. Su proporción cuerpo-agua total debía ser inferior a 56,1, es decir, debían poseer una cantidad de grasa equivalente a cerca del 22 por ciento del peso corporal. Ese valor equivale al percentil 10 del porcentaje cuerpo-agua al completarse el crecimiento de las niñas normales a la edad de 18 años. Una mujer de esa edad, o mayor, que mida 1,65 metros de altura debe pesar al menos 49 kilogramos para que se reanuden sus ciclos menstruales. (Y viceversa: se detendrían los ciclos si su peso disminuyera por debajo de ese umbral.)

Nos desconcertó un poco que en el grupo de mujeres maduras el mantenimiento de los ciclos ovulatorios exigiera pesos y porcentajes de grasa más altos. ¿Por qué se necesitaba más grasa a la edad de 18 años que en el momento de la menarquia? El examen de los datos de la muestra normal nos proporcionó la respuesta: en las mujeres normales, durante el intervalo que media entre el primer ciclo menstrual y la edad de 18 años aumenta la cantidad de grasa. (Por regla general, a los 18 años ya han completado la fase de subfertilidad de la adolescente, en la que el ovario, el útero y las trompas de Falopio todavía crecen y muchos ciclos son anovulatorios.) Encontramos que tanto las niñas de maduración temprana como las de maduración tardía aumentaban, en promedio, 4,5 kilogramos de grasa entre la menarquia y la edad de 18 años, cuando las chicas de nuestra muestra presentaban, por término medio, un 28 por ciento de su peso corporal en forma de grasa. En principio, nos resultaba difícil creer que la mujer almacenara tal cantidad de grasa en el momento de estar preparada para la reproducción, pero los datos basados en disecciones postmortem confirmaron ese valor.

Son muchos los médicos que se apoyan actualmente en los nomogramas a la hora de recomendar la cantidad que deben engordar las mujeres afectas de amenorrea o ciclos anovulatorios por falta de peso. Por supuesto, debe antes descartarse cualquier otra patología. En muchos casos, basta un aumento de entre 1 y 3 kilogramos por encima del peso correspondiente a la talla para que se reanuden las menstruaciones; sin embargo, todavía no puede predecirse, para cada caso, la cantidad exacta en que debe superarse el umbral. Con pesos corporales cercanos al mínimo, pueden producirse ciclos menstruales, aunque anovulatorios. (Tal alteración se pone de manifiesto mediante ecografía del ovario o midiendo los niveles hormonales.) Para asegurar la regularidad de los ciclos ovulatorios podría ser necesario un aumento adicional de peso, por encima del rango indicado por el percentil 25 del porcentaje cuerpo-agua. En realidad, sorprende la estrechez del margen del umbral de peso: algunas atletas estudiadas por nosotros perdían y recuperaban los ciclos menstruales con variaciones de peso de poco más de un kilogramo.

Debo comentar aquí ciertos aspectos de interés. Puesto que en el comienzo y el mantenimiento de la menstruación influyen diversos factores además del peso (por ejemplo, la tensión emocional), algunas mujeres no recuperan la menstruación pese haber alcanzado el peso mínimo para su talla. Asimismo, varía el tiempo necesario para que se reanuden los ciclos por ganancia de peso en función del tiempo que se haya estado amenorreica. También debo señalar que nuestros nomogramas sólo pueden aplicarse de momento a mujeres occidentales. No son válidos para mujeres excesivamente musculosas; los músculos contienen gran cantidad de agua, que pesa bastante, esas mujeres pesan más de lo habitual; por tanto, una mujer musculosa con un peso normal para su talla podría tener poca grasa respecto de su masa magra.

¿Mediante qué mecanismo podría afectar a la fertilidad la variación de la cantidad de grasa corporal? La medición de la hormona liberadora

de gonadotrofinas (GnRH), una hormona hipotalámica, reveló el papel principal que desempeña el hipotálamo en el control de la reproducción. Esa sustancia, que se secreta de manera intermitente, controla la cadena de acontecimientos que conducen a la ovulación. En las mujeres que padecen un déficit de peso o que poseen poca grasa está alterado cuantitativa y temporalmente el patrón de secreción de la hormona liberadora de gonadotrofinas, que se vuelve similar al de las niñas prepúberes. En consecuencia, se desbarata la cascada de acontecimientos que en circunstancias normales instan la ovulación y preparan el útero para el embarazo.

En el cuerpo de la mujer madura, las descargas de GnRH provocan que la glándula hipofisaria libere otras dos hormonas: la foliculoestimulante, que controla el crecimiento de un folículo ovárico (células especializadas que envuelven el óvulo), y la luteinizante, que controla la liberación periódica de óvulos del folículo. Si descienden los niveles de esas hormonas, puede cesar la ovulación.

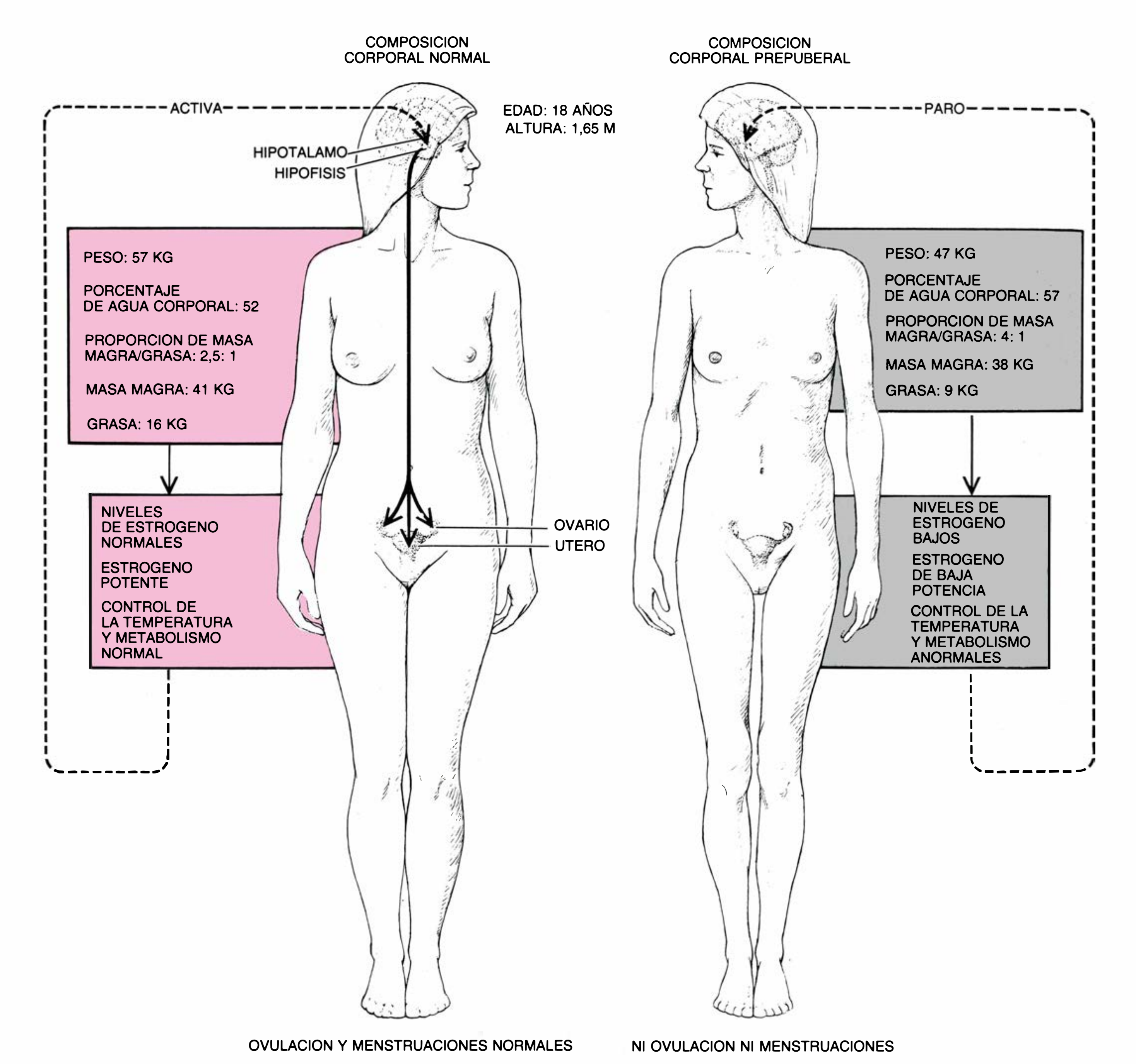
4. **SECRECIONES HORMONALES (*flechas de color*) que instan la ovulación y la aparición de ciclos menstruales regularmente; están sometidas al control del hipotálamo. Las descargas de hormona liberadora de gonadotrofinas, secretada por el hipotálamo, provocan que la hipófisis libere hormona foliculoestimulante, que controla el crecimiento de un folículo ovárico (células especializadas que envuelven el óvulo), y hormona luteinizante, que controla la ovulación (la liberación de un óvulo a mitad de ciclo). En la primera mitad del ciclo, el folículo en crecimiento secreta estrógeno, hormona que modula la actividad de la hipófisis, y quizá también la del hipotálamo (*flecha a trazos*), y estimula el crecimiento de las mamas y del revestimiento del útero. El folículo estalla y se convierte en el cuerpo lúteo (cuerpo amarillo), que secreta progesterona, la cual a su vez estimula la vascularización del revestimiento uterino. Si no se fecunda el óvulo, caen los niveles de estrógeno y progesterona y se desprende entonces el revestimiento (caso de la menstruación). En la función hipotalámica pueden influir señales (*flechas negras*) emitidas por otros centros cerebrales superiores.**

La ovulación y la menstruación precisan también que los ovarios secreten estrógeno y progesterona, cuya producción puede resentirse por el descenso de los niveles de la hormona liberadora de gonadotrofinas y las consecuentes variaciones de las hormonas foliculoestimulante y luteinizante. En condiciones normales, el folículo en crecimiento produce estrógeno, que a su vez regula las secreciones hormonales de la hipófisis, desencadenando a mitad de ciclo un aumento de la hormona luteinizante y, consiguientemente, la ovulación. El estrógeno estimula también el crecimiento de las mamas y el revestimiento del útero. Después de la ovulación, el folículo se transforma en cuerpo lúteo ("cuerpo amarillo") y secreta progesterona, que aumenta la vascularización del revestimiento uterino, preparándolo para la implantación del huevo fecundado. Si no se implanta ningún huevo, los niveles de progesterona y de estrógeno caen y sobreviene la pérdida mensual de sangre.

Se desconoce aún a qué señal responde el hipotálamo cuando se interrumpe la menstruación. Podría recibir información del control de la temperatura anormal o de los cambios metabólicos que se asocian con la pérdida de grasa corporal secundaria a una alimentación insuficiente y a un gasto elevado de energía. Cabe también que el hipotálamo advierta las alteraciones de los niveles estrogénicos que produce la pérdida de grasa.

¿Cómo influye la grasa en la producción de estrógeno? Siempre se ha creído que el tejido adiposo era inerte y que su única función consistía en aislar y almohadillar el cuerpo. Sabemos ahora, en cambio, que se trata de un tejido que interviene activamente en el ciclo de recambio de las sustancias energéticas del organismo. Además, es un almacén de esteroides (hormonas sexuales) e influye sobre la cantidad y la potencia del estrógeno que circula en la sangre.

Varios grupos de investigación han delineado las relaciones existentes entre la grasa corporal y el estrógeno. Pentti K. Siiteri, de la Facultad de Medicina de la Universidad de California en San Francisco, y Paul C. Macdonald, del Centro Cecil H. e Ida Green de Biología de la Reproducción, de Dallas, han descubierto que el tejido graso convierte los andrógenos (hormonas masculinas) en estrógeno. La cantidad convertida supone apenas un tercio del estrógeno que circula en sangre de las mujeres premenopáusicas y



5. UNA MUJER de peso normal (*izquierda*) que pierda un 15 por ciento de su peso (*derecha*) puede no aparentar una delgadez exagerada y dejar de menstruar. Tal pérdida de peso, principalmente una pérdida de grasa, impide la menstruación porque se altera la función hipotalámica. No se sabe de qué modo percibe el hipotálamo la pérdida de grasa. El control hipotalámico de la reproducción podría verse alterado por una disminución en la concentración y la potencia del estrógeno circulante y por una disfunción de la capacidad del organismo para controlar su temperatura y mantener el metabolismo normal.

constituye la fuente principal de estrógeno de las mujeres postmenopáusicas. (La grasa corporal de los hombres también transforma los andrógenos en estrógenos.) El tejido adiposo de las mamas, abdomen, omento (el delantal de grasa del abdomen) y, como hemos demostrado mis colegas y yo, de la médula grasa de los huesos largos convierte los andrógenos en estrógenos.

Jack Fishman, H. Leon Bradlow y sus colegas, de la Universidad Rockefeller, han demostrado que la conversión de un andrógeno en una forma potente o no potente de estrógeno depende de cuán obesa sea la persona. Por ejemplo, las muchachas anoréxicas presentan niveles elevados de estrógenos relativamente inactivos, mientras que las mujeres gruesas producen menos estrógenos de ese tipo y muestran niveles altos de una forma muy potente. Siiteri y sus colegas descubrieron también que las mujeres obesas poseían un nivel relativamente bajo de globulina transportadora de hormonas sexuales; como sugiere su propio nombre, esta sustancia se une al estrógeno. Si la concentración de esa proteína transportadora es baja, la de estrógeno libre circulante será alta. En el momento de la menarquia, las niñas más delgadas presentan una cantidad mayor de proteína transportadora y, por tanto, menos estrógeno libre circulante.

En varios estudios recientes, el nuestro incluido, se demuestra que no sólo por régimen alimenticio llegan las mujeres a perder peso suficiente para alterar la función del hipotálamo e interrumpir la menstruación. Deportistas muy entrenadas de cualquier especialidad (atletas, nadadoras o bailarinas) presentan una elevada incidencia de re-

trasos en la menarquia, de ciclos irregulares y de amenorrea, atribuible, según apunta esa pauta, al ejercicio, posiblemente por desarrollo de la masa muscular y disminución de la reserva adiposa, que elevaría la proporción entre masa magra y grasa.

Mis colegas y yo hemos logrado establecer que, en efecto, el ejercicio regular e intensivo es la causa de tales alteraciones menstruales. Hemos comprobado que la edad promedio de la primera menstruación de colegialas que practicaban la natación y la carrera y que habían empezado los entrenamientos antes de la menarquia era de unos 15 años; las mujeres cuyo entrenamiento comenzaba más tarde tenían una edad menarquial media de unos 12,7 años, similar a la de nuestro grupo de control no deportista y a la de la población general. En nuestra muestra, cada año de entrenamiento premenarquial retrasaba cinco meses la aparición de la menarquia.

Nuestros estudio también demostraba que el inicio de los entrenamientos antes de la menarquia se relacionaba con una alta incidencia de transtornos menstruales. De nuestro grupo de colegialas deportistas que habían empezado a entrenar antes de la menarquia, sólo el 17 por ciento tenía ciclos regulares, el 61 por ciento presentaba ciclos de distribución irregular en el tiempo y el 22 por ciento no menstruaba. Por el contrario, el 60 por ciento de las que comenzaban los entrenamientos después de la menarquia tenía ciclos regulares, el 40 por ciento los tenía irregulares y ninguna padecía amenorrea. En ambos grupos aumentaba la incidencia de ciclos irregulares y de amenorrea durante los entrenamientos intensivos, junto con pérdida de peso y un incremento de la masa magra.

La medición de los niveles hormonales corroboró que la pérdida de grasa contribuía a la aparición de transtornos menstruales en las deportistas. Según indicaban los hallazgos, las atletas delgadas que padecían amenorrea presentan niveles bajos de estrógeno y de hormona luteinizante. La interrupción del ejercicio por lesión restauraba los niveles hormonales normales, recuperándose los ciclos. En experimentos de reciente realización, llevados a cabo por otros investigadores, se ha demostrado también que atletas sometidas a fuerte entrenamiento que padecían ciclos irregulares y amenorrea presentaban una disfunción hipotalámica: los niveles de hormona liberadora de gonadotrofinas eran anormales y similares a los de mujeres con déficit de peso, como sería de esperar si la pérdida de grasa y el aumento de la masa muscular fueran la causa de los transtornos menstruales.

Hemos estudiado también una mujer culturista que, si bien no practica el atletismo ni la danza, se esfuerza en desarrollar la musculatura mediante aparatos de ejercicio. Cuando está en forma para competir, deja de menstruar. Sus niveles hormonales de estrógeno, de hormona foliculoestimulante y de hormona luteinizante son tan bajos como los de las mujeres que siguen un régimen o las deportistas.

Estudios realizados con universitarias que habían sido deportistas confirmaron, desde otra perspectiva, que la obesidad relativa ejerce un efecto importante sobre el aparato reproductor del ser humano. En Boston, uno de nuestros grupos investigó los datos obtenidos de 5398 universitarias de edades comprendidas entre los 20 y los 80 años, la mitad de ellas habían sido atletas y la otra mitad no. En las ex-atletas, la incidencia de cáncer de mama y de otros cánceres del aparato reproductor era significativamente más baja que el grupo de las no deportistas. En el análisis se consideraron factores que podrían interferir en los resultados, como la edad, antecedentes familiares de cáncer y el tabaquismo. La explicación más probable es que las ex-atletas (que eran más delgadas que las no deportistas en todos los grupos de edad) tenían unos niveles de estrógeno más bajos y una proporción mayor de estrógeno de baja potencia. Según parece, los mismos factores que, en concentraciones extremas, pueden provocar la infertilidad en mujeres muy delgadas o deportistas, también ejercen un efecto protector frente a los cánceres relacionados con las hormonas sexuales.

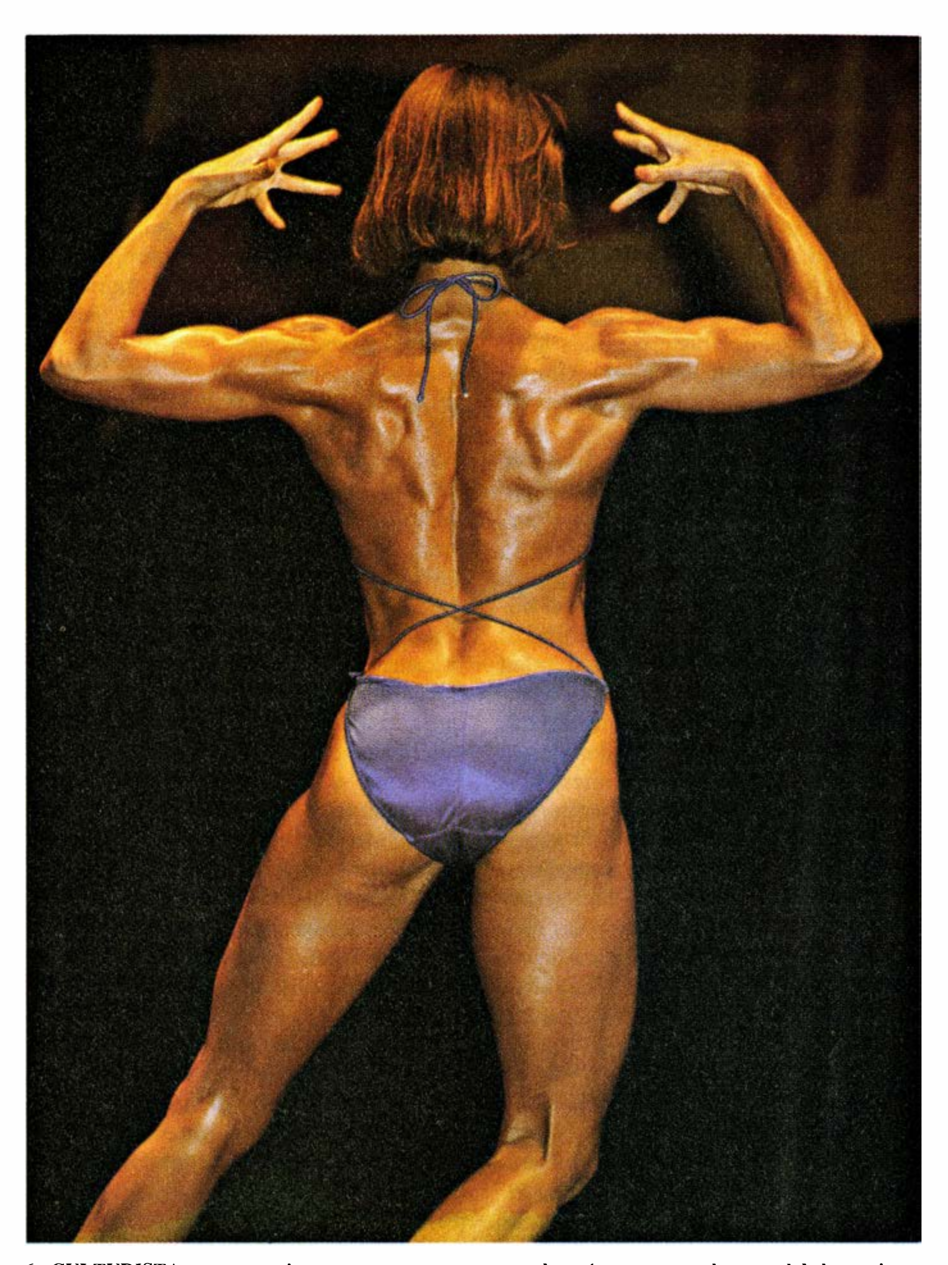
Para obtener pruebas directas de la relación que guardan la composición corporal y la fertilidad, debe recurrirse a experimentos con animales, que pueden disecarse para determinar directamente el peso de la masa magra y de la grasa. Hasta la fecha, todos los métodos utilizados para valorar la grasa corporal en el ser humano son indirectos, incluido el pesaje en el agua. D. Mark Hegsted, Koji Yoshinaga, ambos de Harvard, y yo demostramos que las ratas alimentadas con una dieta rica en grasa tenían el primer estro significativamente antes que las ratas que recibían dietas bajas en grasa y de igual contenido calórico. El análisis directo

de los tejidos, una vez sacrificado el animal, mostraba que ambos grupos tenían un porcentaje cuerpo-agua similar en el momento del primer estro y, por tanto, una proporción masa magra/grasa parecida, aunque los pesos corporales totales fueran distintos.

Otros animales proporcionan datos más circunstanciales, pero no menos interesantes. Considérese el caso de las vacas Charolais, llamadas de doble musculatura, cuya carne, particularmente magra, es muy apreciada. Por desgracia para los ganaderos que las crían, son de pubertad tardía, lo que dificulta su reproducción. De modo similar, los toros Charolais son relativamente infértiles.

Otra serie de descubrimientos se relaciona con un fenómeno insólito de gemeralidad ("flushing"); en concreto, se trada del aumento de la proporción de nacimientos de gemelos en ovejas alimentadas con una dieta alta en calorías durante un preve período –generalmente una semana– antes del apareamiento. Los criadores de ovejas suelen aprovechar ese fenómeno para aumentar el nacimiento de gemelos. El efecto es tan intenso que puede calcularse el número de corderos gemelos que tendrá una oveja sana en función del número de calorías que coma.

Afortunadamente, que se sepa, la mujer bien alimentada no suele sobreovular en respuesta a una ingesta alta en calorías. Sin embargo, existen pruebas de un efecto gemelar residual. Durante la Segunda Guerra Mundial, coincidiendo con las restricciones de alimentos, en Holanda disminuyó la proporción de mujeres que trajeron al mundo gemelos fraternos (de dos huevos), pero no la de las que tuvieron gemelos idénticos (de un huevo que se divide); la proporción de gemelos fraternos recuperó la normalidad una vez regularizada la disponibilidad de comida.



6. CULTURISTA, cuyo organismo posee menos grasa y mucha más masa muscular que el de las mujeres no musculosas de igual peso. De modo característico, esta joven mujer deja de menstruar cuando se encuentra en forma para la competición, como aparece en la imagen. Asimismo, sus niveles de estrógeno, de hormona folículoestimulante y de hormona luteinizante son bajos en ese momento, como da a entender su composición corporal, excesivamente magra. Aunque las deportistas sometidas a entrenamientos intensos no son tan musculosas como las culturistas, también pueden presentar amenorreas subsecuentes al aumento de la masa muscular y a la disminución de la grasa corporal. (Fotografía cedida por Peter C. Otmar.)

Los resultados obtenidos en los estudios con animales y con seres humanos sugieren una posible explicación de las variaciones de la fertilidad natural de las poblaciones humanas, tanto en el pasado como en la actualidad. El número total de hijos vivos nacidos de parejas que no utilizan métodos anticonceptivos va desde sólo cuatro, en el pueblo nómada Bush del desierto del Kalahari (cuyas condiciones de vida son muy duras), hasta una media de once, en el caso de los Hutterites, una próspera secta religiosa de Estados Unidos contraria a la contracepción. La autora basa esas diferencias en la existencia de una relación directa entre la ingesta de alimentos y la fertilidad.

La idea no es totalmente nueva. Hace años, Charles Darwin recogió esa relación, de sentido común, en varias observaciones: los animales domésticos (cuya alimentación es regular y abundante) son más fértiles que sus parientes salvajes; "vivir en condiciones poco favorables retrasa el momento en el que el animal concibe"; la cantidad de comida disponible influye sobre la fertilidad de un animal en particular y resulta difícil engordar a una vaca lactante. Hemos demostrado que las observaciones de Darwin son de aplicación al ser humano y que el aporte de alimentos puede afectar a la fertilidad a lo largo de toda la vida.

Por ejemplo, según datos referentes al crecimiento y la reproducción de las mujeres en Gran Bretaña a mediados del siglo XIX, las mal nutridas, que crecían y maduraban relativamente despacio (circunstancia que se traduce en la presencia de menos grasa por unidad de masa magra), se distinguían de las bien nutridas a todo lo largo de la vida reproductora: menarquia más tardía, subfecundidad de las adolescentes más larga, edad de máxima fertilidad también más tardía, menor número de hi-

jos vivos por grupo de edad y mayor número de embarazos no completados. Y aún más, la amenorrea que acompaña a la lactancia era más larga, y mayor, por tanto, el intervalo entre nacimientos, mientras que la menopausia (cuando cesan los ciclos menstruales) les llegaba a edad más temprana. En esa población británica como en muchas otras poblaciones del pasado, las parejas pobres que siguen juntas al final de sus vidas reproductoras han tenido sólo seis o siete hijos nacidos vivos.

Hoy, la mayoría de las parejas pobres de los países en vías de desarrollo tiene un número de hijos similar a ese. Parece una descendencia numerosa, pero en realidad esa cifra se encuentra muy por debajo de la capacidad humana media. Se explica la infertilidad relativa de las mujeres porque tienden a alimentarse por debajo de sus necesidades y a realizar ejercicios físicos duros. Si las mujeres mal nutridas tienen menos hijos que las bien alimentadas que no utilizan métodos anticonceptivos, ¿a qué se debe el rápido crecimiento de la población de los países en vías de desarrollo? La paradoja se explica porque el incremento de las modernas medidas de salud pública ha reducido la tasa de mortalidad, mientras que la natalidad se ha mantenido igual.

Tanto si viven en países en vías de desarrollo como en naciones desarrolladas, es necesario que las mujeres sepan que pueden quedar embarazadas incluso aunque estén lactando. En las naciones en vías desarrollo, las madres lactantes mal alimentadas no suelen ovular ni menstruar hasta pasado un año o más del parto. Sin embargo, las mujeres bien nutridas pueden reanudar sus ciclos ovulatorios tres meses después del parto, aunque hayan lactado durante todo ese tiempo. Un intervalo demasiado corto entre embarazos sucesivos puede resultar peligroso, porque el embarazo consume las energías de la madre y el bebé podría pesar poco al nacer, lo que comprometería su supervivencia y aumentaría el riesgo de problemas neurológicos o de otro tipo. Además, los cambios hormonales que acompañan al embarazo reducen la cantidad de leche que produce la madre. Ello amenazaría la salud de los niños lactantes, especialmente en los países pobres, donde importa mucho que el infante mame el máximo tiempo posible, ya que es frecuente que los niños destetados reciban dietas de bajo contenido proteico.

Algunos investigadores sostienen que el patrón de lactancia es el único factor que influye en la duración de la "amenorrea lactacional". Sin embargo, estudios realizados en Africa por Peter G. Lunn y Roger G. Whitehead, de la Universidad de Cambridge, demuestran que la nutrición y el trabajo físico inciden claramente sobre el momento de reaparición de ciclos menstruales regulares y ovulatorios.

Mi trabajo se ha centrado en la mujer, pero la malnutrición y la pérdida de peso también afectan a la capacidad procreadora del hombre. En un estudio clásico de ayuno en hombres, Ancel Keys, Josef M. Brozek y sus colaboradores, de la Universidad de Minnesota, descubrieron que una disminución en la ingesta de calorías y la consiguiente pérdida de peso produce, en primer lugar, una disminución de la líbido. La pérdida continuada de peso provoca una reducción del fluido prostático y, en consecuencia, disminuye la motilidad y la longevidad de los espermatozoos; cuando el hombre pesa un 25 por ciento menos de lo que corresponde a su altura, se reduce la producción de espermatozoos. La recuperación del peso restaura las funciones en el sentido inverso al de la pérdida de las mismas.

En estudios recientes de corredores de maratón y de otros atletas masculinos de élite se ha demostrado que, igual que las mujeres, muchos varones padecen disfunciones hipotalámicas: a menudo, el hipotálamo secreta muy poca hormona liberadora de gonadotrofinas, o la libera de forma anómala, a causa de lo cual los niveles de testosterona (una hormona masculina) son inferiores a los valores normales. No se sabe aún si también resulta perjudicada la fertilidad de esos atletas.

Se ha estudiado poco la importancia de los cambios de fertilidad relacionados con la obesidad en los hombres. Por el contrario, se reconoció hace ya un siglo el valor de la infertilidad temporal que se da en las mujeres demasiado delgadas. En 1884, cuando abundaban los casos de amenorrea nutricional, el médico J. Mathews Duncan aconsejó al Real Colegio británico de Médicos que una mujer considerada estéril se tratara con una dieta abundante, por ejemplo, con asado de buey y vino francés. "Si una mujer seriamente malnutrida quedara embarazada, dijo, serían escasas las posibilidades de que diera a luz un niño viable, o de que ella misma sobreviviera".

El dispositivo de efecto cuántico, ¿transistor del mañana?

El tamaño de los componentes de los circuitos integrados se puede reducir hasta el punto en que los efectos disgregantes dificultan su funcionamiento. Más allá de ese límite, podría surgir un nuevo tipo de dispositivo semiconductor

Robert T. Bate

La industria electrónica y los circuitos integrados comparten un destino inverso. La industria crece a medida que los circuitos se encogen. El crecimiento proseguirá mientras puedan embutirse más y más circuitos en una simple pastilla ("chip"). Pero el sentido común y el análisis de la situación coinciden en suponer que, de aquí a diez años, la disminución de tamaño alcanzará los límites de la técnica de circuitos. Y aun cuando se superen las limitaciones técnicas, las leyes físicas que gobiernan el comportamiento de los componentes de los circuitos impondrán límites fundamentales sobre el tamaño de los componentes. Si pretende mantener su expansión, la industria electrónica necesita otra revolución tecnológica.

Mi trabajo de físico en la empresa Texas Instruments me ha hecho ver la urgente necesidad de desarrollar una nueva frontera para los dispositivos semiconductores. En 1982, Pallab K. Chatterjee publicó un estudio que confirmaba esa preocupación al subrayar cuán cerca estábamos del punto final en la reducción de tamaños. Existe todavía cierto desacuerdo acerca del valor de dicho límite mínimo, con estimaciones que varían entre las 100 y las 500.000 millonésimas de metro. En el curso de estas discusiones, muchos de nosotros hemos llegado a la misma conclusión: algunos de los fenómenos que imponen un límite en el tamaño de los circuitos ordinarios podrían utilizarse para catapultar una nueva generación de dispositivos mucho más eficientes que los actuales. Estos dispositivos se basan en los efectos mecánico–cuánticos que llevan la tecnología de los semiconductores hasta un dominio de la física donde las partículas subatómicas se comportan como ondas y atraviesan barreras que antes eran impenetrables. Con el denominado dispositivo semiconductor mecánico–cuántico, se podrá colocar, eso espero, todos los circuitos de un superordenador en una sola pastilla.

Las estructuras de los dispositivos mecánico–cuánticos se han producido ya, utilizando los mismos materiales de las pastillas al uso: silicio contaminado, arseniuro de galio dopado y sin dopar, y arseniuro de galio y aluminio. Estos dispositivos son, sin embargo, unas 100 veces menores que los dispositivos empleados en los circuitos integrados actuales; por eso, el diseño y la fabricación de un dispositivo viable constituye un reto de primera magnitud. Los procesos de fabricación tendrán que ser mucho más refinados; y será necesario desarrollar nuevos métodos de interconexión y arquitectura para superar los problemas implicados en la reducción de tamaño.

A pesar de las dificultades que plantean todos estos métodos, no hemos de olvidar que el desarrollo de los dispositivos cuánticos podría abaratar el coste de los equipos hasta diez mil veces. En cualquier caso, las dificultades en cuestión son menores que las que supondría la introducción de nuevos materiales para los que todavía no existe un proceso tecnológico adecuado. El progreso alcanzado en Texas Instruments, así como en otros laboratorios universitarios, públicos y privados, de todo el mundo sugiere que los dispositivos cuánticos podrían ser los protagonistas de la revolución que está demandando la industria electrónica.

La razón para reducir el tamaño de los componentes de los circuitos integrados reside en el abaratamiento del coste y en el acortamiento del tiempo necesario para realizar una función determinada. La mayoría de las funciones se llevan a cabo mediante transistores, que actúan sobre todo como interruptores. La velocidad y la precisión con que se puede controlar una operación de conexión/desconexión en un transistor, así como la potencia necesaria para acometer esa operación, está relacionada con el tiempo y el coste de la función realizada por dicho dispositivo. Dado su tamaño, un interruptor de transistor que opere según principios mecánico–cuánticos sería más rápido y consumiría menos energía que un transistor ordinario; por otra parte, debido a los efectos peculiares de los fenómenos cuánticos, el grado de control permitido sería mucho mayor.

Estas propiedades se apreciarán mucho mejor si las comparamos con el comportamiento de los transistores tradicionales. Los más utilizados en la actualidad son los transistores de efecto de campo (FET). Se hallan constituidos por materiales semiconductores contaminados con ciertos elementos que proporcionan los portadores de cargas eléctricas. Estos portadores de cargas pueden ser electrones, es decir, partículas cargadas negativamente, o "agujeros" positivos; cuando un semiconductor posee electrones como portadores de carga, se dice que está dopado negativamente (tipo n); y cuando la conducción de carga se lleva a cabo mediante el movimiento de agujeros, se dice que está dopado positivamente (tipo p). El silicio ha constituido la materia prima tradicional de los circuitos integrados, aunque se han construido transistores de arseniuro de galio (GaAs), más rápidos.

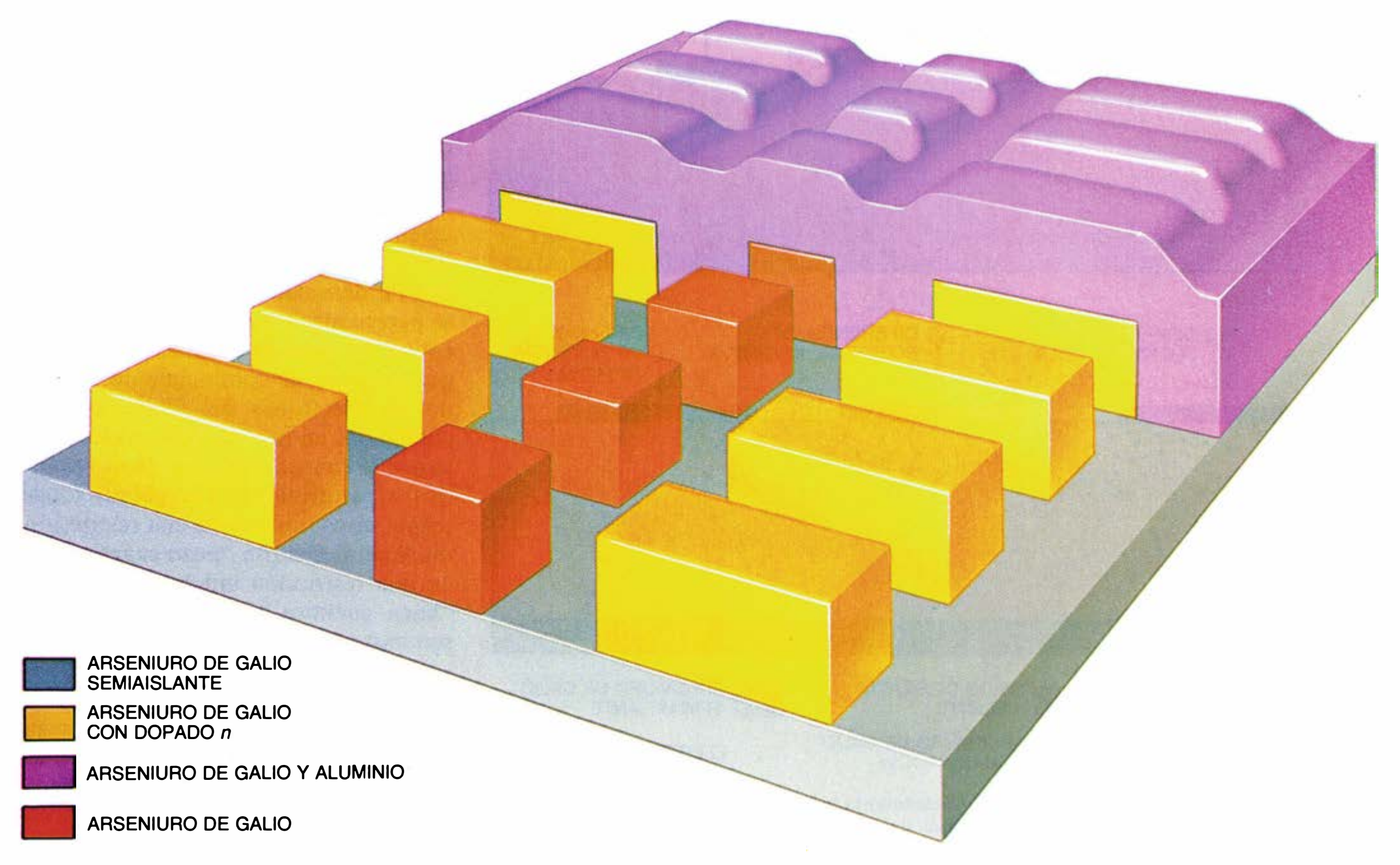
Los dos tipos de transistores tienen configuraciones ligeramente diferentes [*véase la figura 2*]. En un FET de silicio

típico, una región de silicio con dopado *n*, denominada fuente, está separada de otra región con dopado *n*, conocida como sumidero, mediante un canal con dopado *p*. En la parte superior de este canal, hay un electrodo metálico —la puerta—, cuyo contacto directo con el silicio con dopado *p* se evita mediante una capa aislante de óxido de silicio. Este dispositivo metal-óxido-semiconductor se suele denominar con las siglas MOS-*n*, MOS-*p* y MOSFET. Al sumidero se le aplica un voltaje positivo; cuando se aplica también a la fuente un potencial positivo más débil, los electrones se agrupan en el canal de silicio bajo la puerta y dan lugar a un puente de portadores de carga negativa entre las dos regiones con dopado *n*. Este puente —la capa de inversión— permite que los electrones de la fuente se muevan hacia el voltaje positivo del sumidero. La corriente se puede interrumpir al dejar de aplicar el potencial sobre la puerta, dispersando así los electrones en la capa de inversión.

Un transistor de arseniuro de galio posee también un electrodo de puerta y sendos terminales que sirven como fuente y sumidero, pero la parte con dopado *n* del sustrato no está localizada [véase "Transistores de arseniuro de galio", por William R. Frensley, INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, octubre de 1987]. Cuando se aplica un potencial positivo a la puerta y al sumidero, la corriente fluye libremente desde la fuente; en cambio, cuando a la puerta se le aplica un potencial negativo, repele a los electrones de la región situada bajo ella e interrumpe, en consecuencia, el paso de corriente.

Los dos transistores citados son dispositivos con tres terminales; en ambos casos, la forma más sensible de conectar y desconectar los transistores consiste en ajustar el voltaje de la puerta. Así, los transistores se "apagan" y "encienden" cambiando el voltaje de la puerta. Estos dispositivos trabajan perfectamente a las escalas actuales; pero, si se reduce su tamaño, la distinción entre los estados de conexión y desconexión resulta imprecisa. A escalas más pequeñas, las pérdidas de corriente impiden que un transistor esté realmente "desconectado"; este hecho se traduce, además, en un consumo innecesario de energía. Las impurezas o defectos en un cristal semiconductor pueden difundir electrones, lo que provoca una conducción más lenta y un mayor tiempo de conexión/desconexión. A pesar de su utilidad, los FET modernos presentan un problema: cuanto más pequeños son, tanto peor funcionan.

El sistema de operación de los dispositivos semiconductores cuánticos difiere cualitativamente. En virtud de ello, el rendimiento y la precisión en el control de conexión y desconexión de dichos dispositivos resultarán muy superiores a los de los transistores ordinarios, con unos tamaños que éstos no pueden alcanzar. Esta diferencia se pone de manifiesto en las respectivas curvas características de corriente-voltaje. En particular, algunos dispositivos semiconductores cuánticos poseen una resistencia diferencial negativa; es decir, dados ciertos valores del voltaje, la intensidad de la corriente disminuye cuando el voltaje aplicado aumenta. En una gráfica de la intensidad en función del voltaje, esta propiedad se pone de manifiesto a través de un máximo y un mínimo de la intensidad [*véase la figura 4*]. La aparición de una resistencia diferencial negativa es, con frecuencia,



1. PASTILLA CUANTICA dotada de elementos 100 veces menores que los componentes de los "chips" ordinarios. La corriente pasa de un bloque de arseniuro de galio, dopado negativamente (dopado *n*) a otro bloque de dicho compuesto a través de una capa de arseniuro de galio y aluminio, un cubo de arseniuro de galio y finalmente otra capa de arseniuro de galio y aluminio. Debido a ciertos efectos mecánico-cuánticos que se ponen de manifiesto en capas de este tamaño, la corriente que atraviesa un dispositivo cuántico es extremadamente sensible a las variaciones producidas en el voltaje aplicado y, por tanto, puede controlarse con gran precisión. Arriba se ilustra un modelo de dicho dispositivo; dada su complejidad, no se ha fabricado ninguno que funcione realmente.

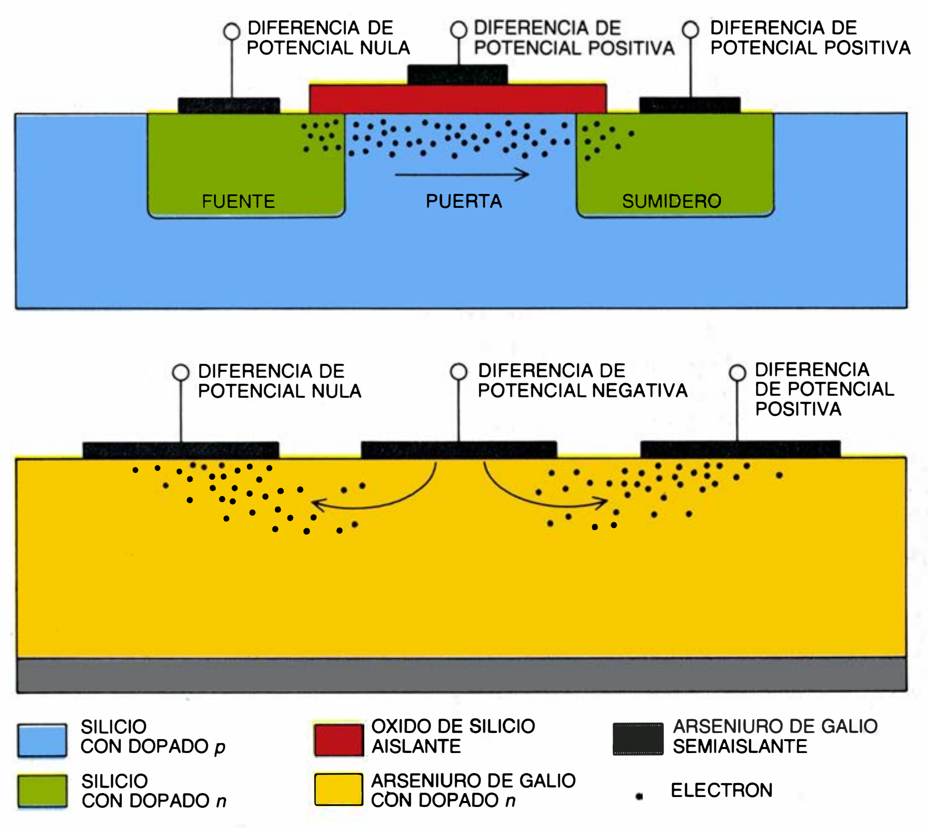
la única indicación con que cuenta un físico sobre la presencia de efectos cuánticos en un dispositivo experimental.

De los efectos cuánticos, el fenómeno más escurridizo es la naturaleza ondulatoria de los electrones. La teoría cuántica predice que un electrón mostrará un comportamiento ondulatorio siempre que las dimensiones de la región donde está confinado, o de las barreras erigidas para contenerlo, se acerquen al valor de la longitud de onda del electrón en cuestión. Así, en un dispositivo cuántico, una dimensión al menos es comparable con dicha longitud de onda. En el arseniuro de galio a temperatura ambiente, dicha longitud de onda es de 200 angstrom (20 milmillonésimas de metro).

Las barreras capaces de contener electrones son barreras de energía, más que barreras físicas. Todos los electrones poseen una cantidad finita de energía y ocupan determinados niveles energéticos; los niveles disponibles son característicos de cada material. Un grupo de niveles poco espaciados entre sí constituyen una banda. En la mayoría de los sólidos, los niveles energéticos agrupados en una banda están tan juntos que se pueden considerar continuos; en consecuencia, un electrón puede cambiar de nivel gracias a un impulso de energía infinitesimalmente pequeño.

Las posiciones relativas de las bandas de energía determinan si la electricidad puede pasar a través de dos materiales diferentes. Para que un electrón pase de un material a otro sin cambiar su energía, las bandas de los dos materiales en cuestión deben solaparse. En particular, el nivel medio ocupado por los electrones en el primer material —denominado nivel de Fermi— debe coincidir con una banda de energía del segundo material. Si la banda de energía del segundo material se presenta para un nivel de energía mucho mayor que el nivel de Fermi del primero, el segundo material actúa de barrera respecto del movimiento de los electrones.

Por ejemplo, bajo condiciones ordinarias, el arseniuro de galio y aluminio (AlGaAs) presenta una barrera para los electrones del arseniuro de galio con dopado *n*. Un electrón no puede pasar del GaAs dopado al AlGaAs, debido a que la banda de conducción de éste posee una energía mucho mayor que el nivel de Fermi del GaAs. Ahora bien, si las dimensiones físicas de la barrera se alteran de forma tal que la naturaleza ondulatoria de los electrones sea relevante, dichas partículas pueden atravesar el AlGaAs por "efecto túnel" y dicho semiconductor deja de ser un obstáculo. En consecuencia, cuando se coloca una lámina de AlGaAs con un espesor inferior a 200 angstrom entre dos láminas de GaAs dopado, los electrones la atraviesan por efecto túnel y pasan de una a otra lámina de GaAs. El efecto túnel es un efecto cuántico.



2. TRANSISTORES DE EFECTO DE CAMPO. Constituyen la mayoría de los componentes de los circuitos integrados existentes en la actualidad y se comportan de acuerdo con las leyes de la física clásica. En el transistor de silicio (*esquema superior*), los electrones se mueven entre la fuente y un sumidero positivo al aplicar un potencial positivo a la puerta. El potencial de la puerta crea un puente de electrones entre las dos regiones con dopado *n*; si este puente no existiera, los electrones del canal de silicio cargado positivamente (con dopado *p*) se dispersarían y no se podría atravesar el canal. Por el contrario, el transistor de arseniuro de galio (*esquema inferior*) conduce la electricidad cuando no existe un potencial aplicado a la puerta, pero la aplicación de un voltaje negativo interrumpe el paso de los electrones desde la fuente hacia el sumidero.

Cuando las barreras confinan a los electrones en un espacio de dimensiones comparables a las longitudes de onda correspondientes, estas partículas están sujetas a otros dos efectos cuánticos relacionados entre sí: la cuantización de tamaño y la resonancia. La cuantización de tamaño da lugar a que el continuo de niveles energéticos que suele haber en la banda de conducción de un sólido se articule en cuantos, o estados de energía discretos. Esta propiedad se ilustra con mayor claridad representando gráficamente la correspondiente densidad de estados energéticos, es decir, el número de estados discretos permitidos para un electrón por unidad de energía [*véase la figura 3*].

Por ejemplo, cuando una brizna de arseniuro de galio sin dopar se coloca entre dos barreras de AlGaAs, la gráfica de densidad de estados del GaAs se parece más a una escalera que a una colina. El nivel de cuantización depende del grado de confinamiento. Cuando los electrones del GaAs quedan confinados en las tres dimensiones (en lo que se conoce como un "punto cuántico"), sus niveles de energía son totalmente discontinuos; en una restricción unidimensional (un "pozo cuántico") y en una restricción bidimensional (una "línea cuántica") los niveles todavía son bastante continuos.

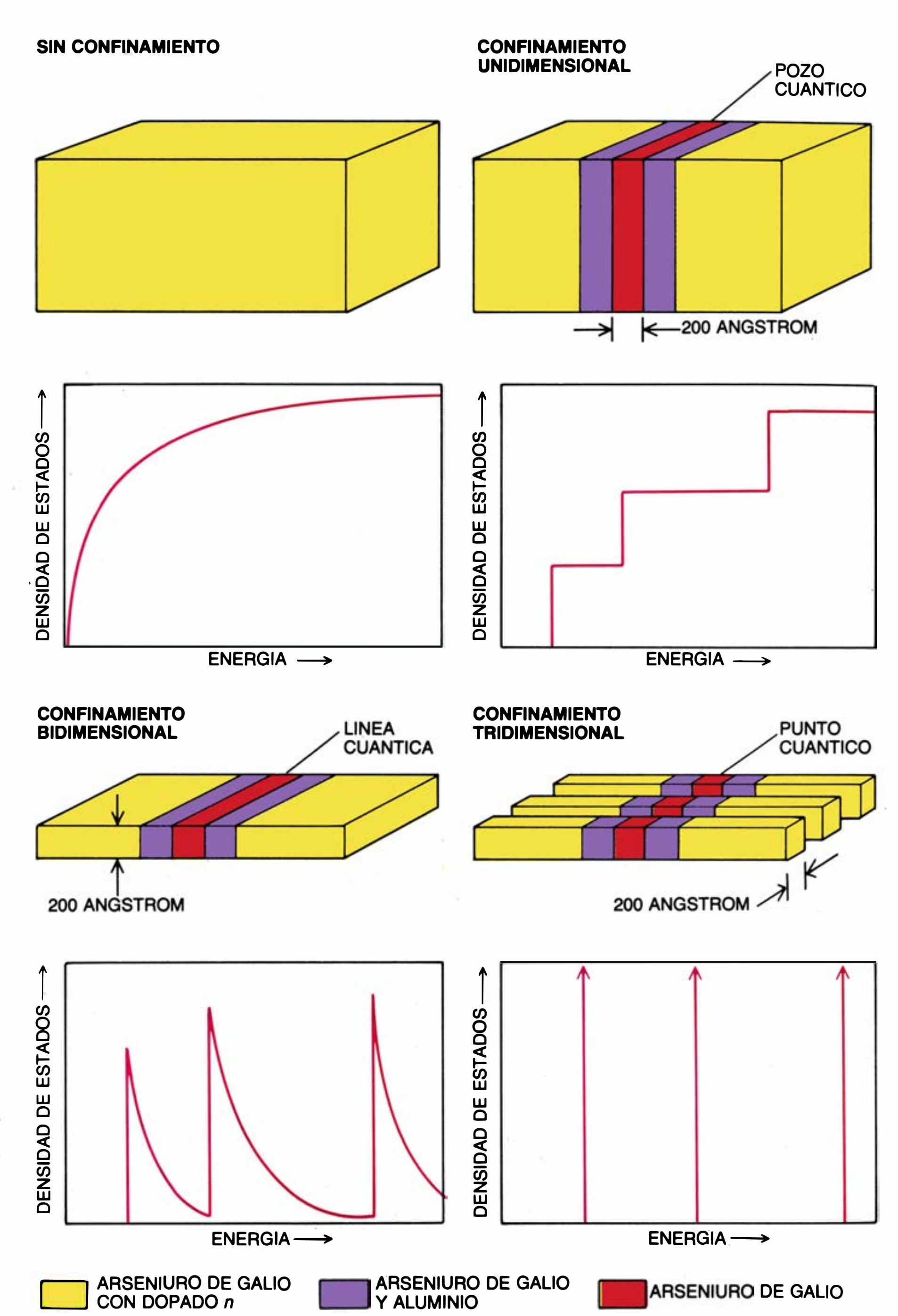
La otra consecuencia del confinamiento cuántico, la resonancia, se produce únicamente cuando se alcanza cierto grado de cuantización de tamaño. Por ejemplo, las ondas asociadas a los electrones que penetran en un pozo cuántico se reflejan en las paredes opuestas del pozo; las ondas rebotan una y otra vez en el interior de la cámara cuántica [*véase la figura 5*]. Como resultado de este hecho, se produce un

aumento sustancial en la corriente por efecto túnel y se presenta una resonancia. La cuantización de tamaño y la resonancia son consecuencia de la interferencia constructiva de las ondas que se mueven en un sentido y otro. Es difícil separar el aumento de la corriente que se puede atribuir a la resonancia del aumento originado por el incremento en la densidad de estados existentes en un nivel energético.

Esta distinción no es esencial para el funcionamiento de los transistores. Lo que importa es que, en un dispositivo de efecto cuántico, la aplicación de dos voltajes ligeramente distintos puede dar lugar a dos respuestas dispares. Las diferencias deberían ser más pronunciadas en la estructura más confinada, el punto cuántico, debido a que en este caso el nivel de cuantización es máximo. Para los voltajes en que se produce el efecto túnel, la intensidad de la corriente aumenta en virtud de la alta densidad de estados y de los efectos de resonancia y se produce un máximo; con otros voltajes, la ausencia total de estados para energías intermedias entre niveles cuánticos asegura que el efecto túnel sea muy débil; en la gráfica correspondiente aparece un mínimo.

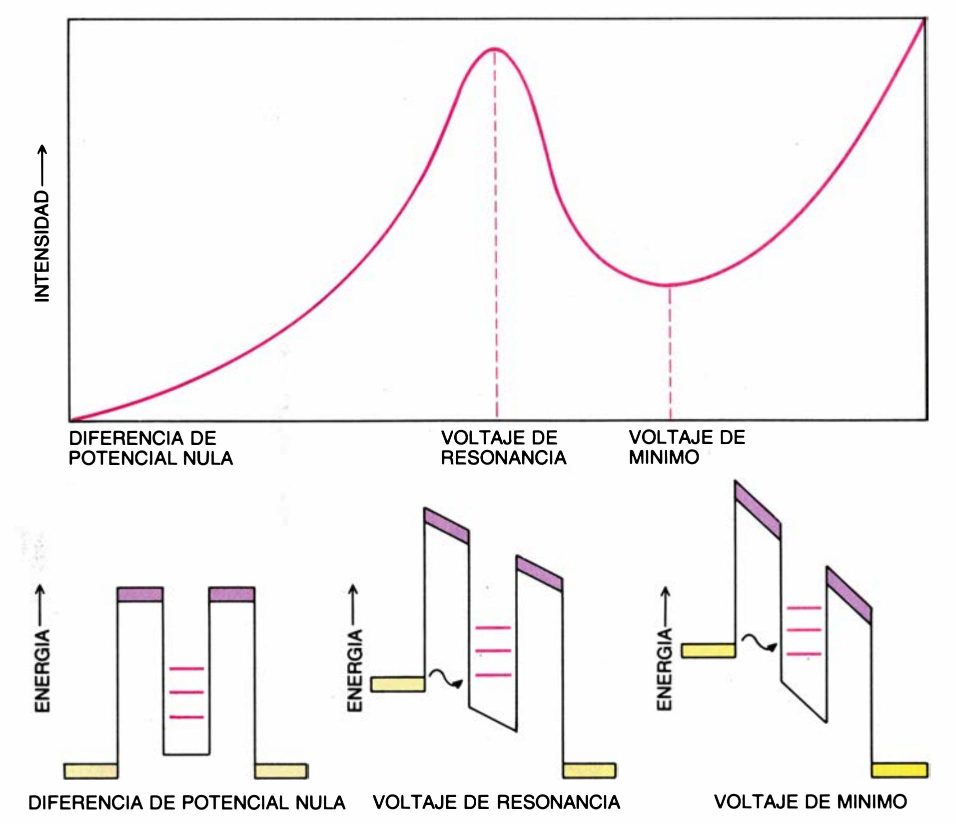
Para representar la forma en que estos efectos cuánticos se manifiestan en un transistor, imaginemos dos láminas de GaAs con contaminación *n*, separadas por un punto cuántico de AlGaAs-GaAs. Los electrones que intentan pasar de una de las láminas de GaAs a la otra deben atravesar por efecto túnel una lámina de AlGaAs hasta llegar al punto cuántico y a continuación atravesar la otra lámina de AlGaAs. Sin embargo, estos electrones no pueden entrar en el punto cuántico, a menos que los niveles de energía en dicho punto coincidan con el nivel de Fermi del arseniuro de galio dopado que los emite.

El nivel de Fermi del GaAs "emisor" puede aumentarse en relación con el resto de la estructura aplicando un voltaje positivo al GaAs contaminado y situado al otro lado del punto ("colector"). Cuando se alcanza cierto voltaje, el nivel de Fermi del emisor se iguala a uno de los niveles de energía del punto y los electrones entran en él y resuenan en su interior. La conducción que tiene lugar para otros voltajes resulta despreciable debido a la excitación térmica y a la pérdida y difusión de electrones. Se tiene así una forma de controlar con precisión la conexión y desconexión de un dispositivo semiconductor.

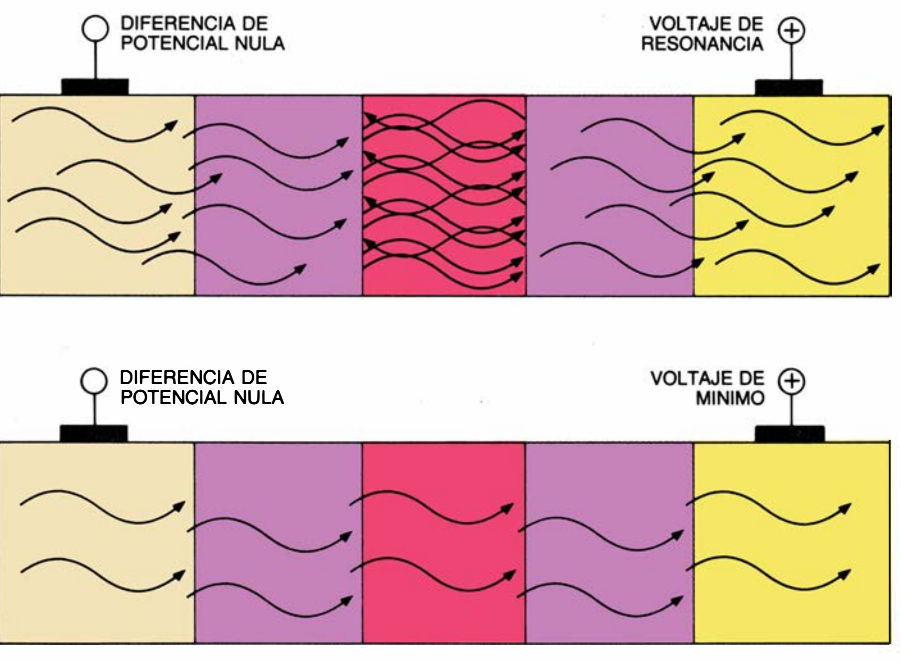


3. EL CONFINAMIENTO CUANTICO altera los estados de energía que puede ocupar un electrón en un material conductor. Por ejemplo, en un trozo ordinario de arseniuro de galio con dopado *n* (*arriba a la izquierda*), los electrones se mueven libremente en un continuo de estados; ahora bien, cuando se erigen barreras unidimensionales de arseniuro de galio y aluminio alrededor de un pozo cuántico de arseniuro de galio con una anchura del orden de la longitud de onda de un electrón (200 angstrom), la densidad de estados energéticos en el pozo se cuantiza, es decir, se hace discontinua (*arriba a la derecha*). Cuando se reduce la altura del pozo, se produce una línea cuántica (*abajo a la izquierda*). El grado de cuantización depende del grado de confinamiento; una verdadera cuantización solamente resulta posible cuando el arseniuro de galio queda confinado en las tres dimensiones de la estructura de un punto cuántico (*abajo a la derecha*).

Aunque esta descripción parece sugerir que la incorporación de una estructura de punto cuántico en un dispositivo cuántico acoplado sea una mera posibilidad remota, la fabricación de estos dispositivos puede convertirse en realidad dentro de pocos años. De hecho, la utilización de los efectos cuánticos en los dispositivos semiconductores data de los años cincuenta. El diodo de túnel Esaki, llamado así en honor de su inventor, Leo Esaki, actualmente en el Centro de Investigación Thomas J. Watson de IBM en Yorktown Heights, fue el primer dispositivo semiconductor cuántico. En este diodo, dos semiconductores con dopado *n* y *p* se unen para formar una



4. CURVA CARACTERISTICA DE INTENSIDAD-VOLTAJE de un dispositivo de pozo cuántico. Dicha línea pone de manifiesto la cuantización de los estados de energía en un pozo de arseniuro de galio. Estos dispositivos presentan un intervalo de voltaje para el que la corriente que conduce el dispositivo disminuye cuando aumenta el voltaje aplicado a uno de los contactos de arseniuro de galio con dopado *n*. Esto sucede debido a que, para cierto valor del voltaje (el voltaje de resonancia), la energía media de los electrones de la sustancia con dopado *n* (*parte superior de la banda amarilla*) se desplaza hasta un nivel que coincide con un estado cuántico del pozo (*en rojo*); por encima de dicho voltaje, la banda de energía del arseniuro de galio dopado se sitúa entre los estados cuánticos. Así, para el voltaje de resonancia, un electrón (*flecha*) puede atravesar por efecto túnel la barrera de energía del arseniuro de galio y aluminio que existe en el pozo (*púrpura*), siempre que en el mínimo del voltaje no haya estados a los que el electrón pueda llegar por efecto túnel.



5. LOS ELECTRONES QUE SE MUEVEN POR EFECTO TUNEL (*flechas*) resuenan en un pozo cuántico de arseniuro de galio al aplicar un voltaje de resonancia positivo a uno de los contactos (*arriba*). Las ondas de los electrones rebotan una y otra vez en el interior del pozo, reforzando la corriente hasta dar lugar al máximo que se reproduce en la gráfica de la figura 4. En el mínimo del voltaje (*abajo*), el efecto túnel y la resonancia son poco importantes y, por tanto, el valor de la intensidad disminuye considerablemente.

capa que no posee en absoluto portadores de carga. Cuando el dopado es muy elevado, la capa vacía se hace lo bastante delgada como para que los electrones puedan atravesarla por efecto túnel. Sin embargo, este diodo nunca tuvo demasiado éxito, debido a que los dispositivos de tres terminales que se empezaron a utilizar por aquel entonces resultaban más rentables y prácticos.

En los años sesenta, los investigadores del Centro de Investigación Watson comprobaron que el confinamiento cuántico en una dimensión se producía en la capa de inversión del MOSFET de silicio. Dado que la influencia de los efectos cuánticos sobre las características de un dispositivo son muy pequeñas, este descubrimiento tuvo poca repercusión sobre el desarrollo de los transistores. El trabajo posterior de Nick Holonyak, Jr., de la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign, permitió que los pozos cuánticos fueran componentes ordinarios de los láseres. En los años setenta, Esaki, junto con Leroy L. Chang, del Centro de Investigación Watson, y Raphael Tsu, hoy en la Universidad Agrícola y Técnica de Carolina del Norte, llevaron a cabo los primeros experimentos sobre el efecto túnel resonante. Los efectos cuánticos no fueron provocados de forma deliberada sobre los transistores hasta una fecha bastante reciente, en los transistores de efecto de campo con dopado y modulación. Sin embargo, los pozos cuánticos de estos dispositivos sólo sirven para aumentar la movilidad de los electrones que, por lo demás, se comportan como en los transistores ordinarios.

Aunque puedan parecer tangenciales, todos estos avances contribuyeron a desarrollar las técnicas necesarias para la fabricación de dispositivos semiconductores cuánticos; las técnicas exigidas para fabricar estructuras experimentales estaban ya desarrolladas cuando despertó el interés hacia ese campo de trabajo. A lo largo de los últimos cuatro años, la realización de estructuras cuánticas de dimensión cero ha merecido la atención de investigadores de todo el mundo. En los Laboratorios Bell de la ATT, la empresa IBM, el Instituto de Tecnología de Massachusetts, la Universidad de Cambridge y los Laboratorios de Investigación de Philips, se ha conseguido la cuantización de tamaño en líneas cuánticas para dispositivos de silicio y de arseniuro de galio; los puntos cuánticos

se han fabricado en el Centro Bell para la investigación de Comunicaciones de la empresa ATT, en los Laboratorios de Investigación Hughes y en la Universidad de Glasgow, así como en la empresa Texas Instruments, donde se obtuvo la señal más clara de la cuantización de tamaño en puntos.

Aunque todavía no se ha construido un dispositivo semiconductor operativo a partir de una estructura de puntos cuánticos, se confía en poder disponer de un prototipo en un plazo de uno o dos años. Uno de los objetivos de la investigación actual es la conversión de los dispositivos cuánticos, que son más fáciles de fabricar en forma de diodos, en dispositivos con tres terminales, en los que el tercer contacto modula directamente el potencial de la estructura cuántica. Esta conexión proporcionaría un dispositivo muy compacto, capaz de alcanzar velocidades de conexión y desconexión muy elevadas, cercanas al máximo permitido por el efecto túnel. Sin embargo, el desarrollo de una tecnología capaz de proporcionar unos contactos fiables y no destructivos para capas muy delgadas exigirá gran imaginación.

Si se colocaran puntos cuánticos en estrecha proximidad, los electrones podrían pasar de un punto a otro –es decir, de un estado cuántico a otro– por efecto túnel. Esta disposición constituiría un hito en el control de circuitos, pues los estados de energía de los electrones, tanto en el punto de partida como en el punto de llegada, podrían controlarse de manera estricta. Una vez más, el reto estriba en la fabricación de estructuras cientos de veces menores que cualquiera de las utilizadas en los dispositivos semiconductores actuales. Por otra parte, este grado de reducción en la escala de tamaños planteará muchos problemas en las conexiones y la arquitectura, problemas que la industria tendrá que resolver antes de que los dispositivos semiconductores cuánticos puedan comercializarse.

El nivel de compromiso de tantos equipos de investigación en relación con una tecnología tan problemática es una prueba del enorme potencial de estos dispositivos y de la fe en sus posibilidades para dirigir la próxima revolución de los semiconductores. Los costes y riesgos existentes deben afrontarse si queremos revitalizar una industria electrónica que envejece muy deprisa; los resultados sólo pueden beneficiar a una sociedad acostumbrada a depender de los circuitos integrados.

El puerto romano de Cosa

Alrededor del 100 a. de C. contaba con un alfar, un lagar, una pesquería y un sistema de distribución de agua, así como un puerto con espigones de hormigón, todo ello controlado por una familia de empresarios: los Sestii

Anna Marguerite McCann

En la Antigüedad –cuando el mar era el medio principal para el comercio y la comunicación internacional– los puertos poseían una importancia mayor incluso que en la actualidad. Eran centros para la importación de bienes, ideas y gentes, así como para la acumulación de riqueza a través de la exportación. Mas, a pesar de su relevancia, los arqueólogos han prestado escasa atención a los puertos. Desde el descubrimiento de las bombonas de oxígeno sumergibles (SCUBA) en 1942, los barcos hundidos han centrado el interés de los arqueólogos submarinos. De ahí la importancia de abordar el estudio de un puerto antiguo con los recursos metodológicos de la arqueología moderna. Esto es exactamente lo ocurrido en el puerto romano de Cosa, donde un equipo de arqueólogos, geólogos, ingenieros y otros profesionales ha trabajado durante veintidós años bajo mi dirección.

Durante la época republicana tardía, en los siglos II y I a. de C., Cosa fue un puerto de primer rango en el Mediterráneo occidental. Los cimientos de su riqueza estaban constituidos por un conjunto comercial extraordinario, que abarcaba un puerto con espigones de hormigón, un faro, una pesquería, talleres para la elaboración de ánforas, vino y productos pesqueros, junto con maquinaria para la extracción de agua potable de un manantial. Casi todo esto estaba controlado por una sola familia, los Sestii, que ejercieron sobre la tecnología la misma influencia que los Medici sobre las artes durante el Renacimiento. Aunque los Sestii eran conocidos como figuras de la política romana, su papel en el comercio internacional ha constituido una sorpresa.

Pero las excavaciones del puerto han aportado otras novedades. Así, los orígenes del comercio internacional de Roma han retrocedido dos siglos. Se ha hallado el primer ejemplo datado de hormigón hidráulico, hecho con un tipo de mortero llamado pozzolana, amén de los restos del más antiguo faro romano. Descubrimos también el primer testimonio arqueológico de maquinaria hidráulica de un tipo empleado aún en el Próximo Oriente. Como resultado general de nuestras excavaciones se ha producido algo poco frecuente: se ha añadido en el mapa un nuevo puerto antiguo de primer orden.

Los romanos fundaron la colonia latina de Cosa en el 273 a. de C., inmediatamente después de la conquista de las cercanas ciudades etruscas de Vulci y Volsinii. Alrededor de 140 kilómetros al norte de Roma (fácilmente un día de navegación), Cosa ofrecía, en muchos cientos de kilómetros, el único promontorio alto con un fondeadero protegido. En los días de navegación de cabotaje, cuando las luces para pilotar y los vigías costeros eran esenciales, el promontorio de Cosa debió constituir un punto de referencia clave para los barcos que se dirigían hacia el oeste bordeando la península de Argentario, al noroeste de Cosa, y hacia el norte, hacia la costa de Galia (actual Francia) y España. El control de la punta de Cosa era vital para cualquier sistema de defensa naval o de comercio, no sólo para la región inmediata, sino también para todo el Mediterráneo occidental.

La primera mitad del siglo III a. de C., que conoció la fundación de la colonia de Cosa, fue una época crucial para Roma. La conquista de los etruscos por el norte y de los griegos por el sur permitió a los romanos el control absoluto de la península Itálica. En tales circunstancias, se lanzaron al exterior y se enfrentaron a la gran potencia marítima de Cartago en las tres guerras púnicas, de las que Roma emerge, a mediados del siglo II a. de C., como principal fuerza naval y comercial del Mediterráneo. El éxito de esta expansión se debió en gran medida al establecimiento sistemático de colonias marítimas en la costa del Tirreno. (El papel defensivo de estas colonias ha sido resaltado desde hace tiempo.) Nuestras excavaciones en el puerto de Cosa, sin embargo, sugieren que la rivalidad comercial con Cartago por el comercio del Mediterráneo occidental fue también un factor dominante en el establecimiento de las colonias marítimas.

La importancia del comercio proyecta una nueva perspectiva sobre la colonia de Cosa, que se extiende a lo largo de más de 30 kilómetros en una parte de la línea costera toscana, conocida hoy como la Maremma. Debemos resaltar que el puerto no era el único elemento constitutivo de la colonia. Sobre la parte posterior del mismo se erige la colina fortificada, donde se sitúa la ciudad de Cosa, parcialmente excavada por la Academia Americana de Roma en una larga campaña arqueológica que empezó en 1948. La ciudad era obviamente el centro religioso y cívico de la colonia, y fue inicialmente proyectada como núcleo de la vida colonial de la región. Nadie sospechaba que allí estuviera sumergido un importante puerto mediterráneo, pero ahora es evidente que el Portus Cosanus constituía el centro económico de la colonia y su principal fuente de riqueza.

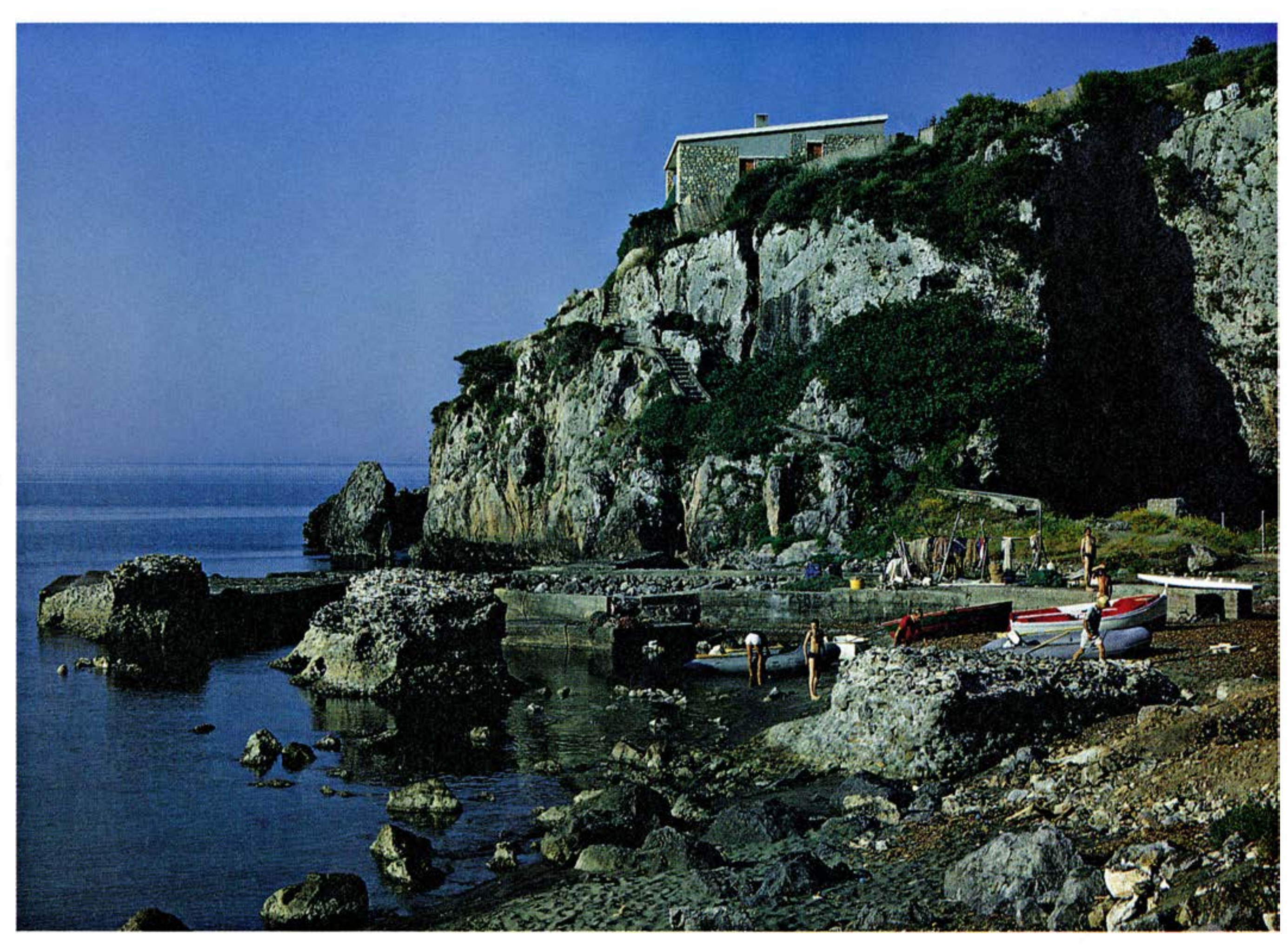
Una razón del éxito del puerto reside en el hecho de poseer el único manantial de agua potable de la zona. Mientras que la ciudad de Cosa y el cercano puerto de Hércules (el actual Port'Ercole) en la península de Argentario estaban a expensas del agua de lluvia, aquél contaba con numerosas fuentes que proporcionaban abundante agua potable para barcos, marineros y diferentes industrias: un alfar, un lagar, una pesquería y una industria de salazones de pescado. En el transcurso de

nuestras excavaciones se liberó la mayor de las fuentes manando aproximadamente 1500 litros por minuto. A juzgar por el número de cántaros rotos desenterrados en las inmediaciones, el manantial debió abastecer a los habitantes de las zonas vecinas en la antigüedad.

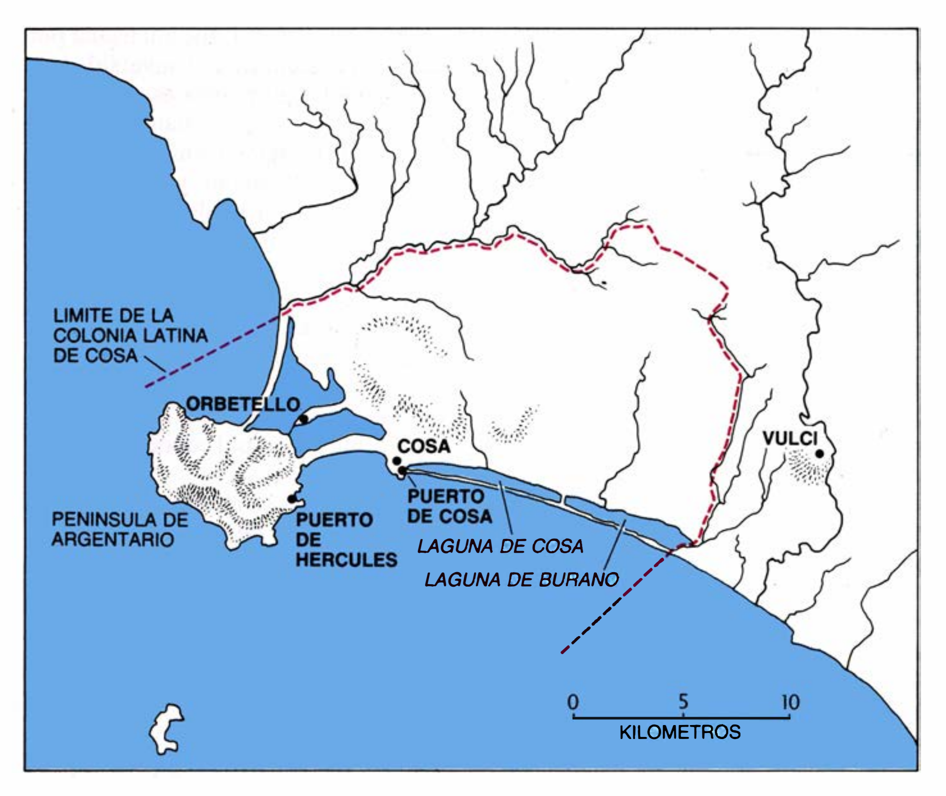
¿Qué aspecto ofrecía el puerto de Cosa en la época de esplendor de su actividad comercial, alrededor del año 100 a. de C.? El puerto, que era el elemento central del complejo, había sido profundamente modificado en su estructura natural por los ingenieros romanos. Para aumentar la protección ofrecida por el promontorio, se construyó un rompeolas con rocas calizas traídas de los acantilados que dominan la rada. La plataforma rocosa, de unos 110 metros de longitud y 70 de ancho, se sumergió en el fondo arenoso del puerto, pero en época romana tuvo que haber emergido sobre el agua. Se le proyectó para romper las olas entrantes, permitiendo al mismo tiempo la libre circulación de las corrientes costeras a través de sus rocas apiñadas con holgura, impidiendo con ello el enarenado, que constituye la mayor amenaza para los puertos. John D. Lewis, del ejército de EE.UU., ingeniero de la excavación, ha llegado a la conclusión de que ésta fue la obra de experimentados ingenieros que estaban bastante familiarizados con las condiciones del oleaje y de las corrientes locales.

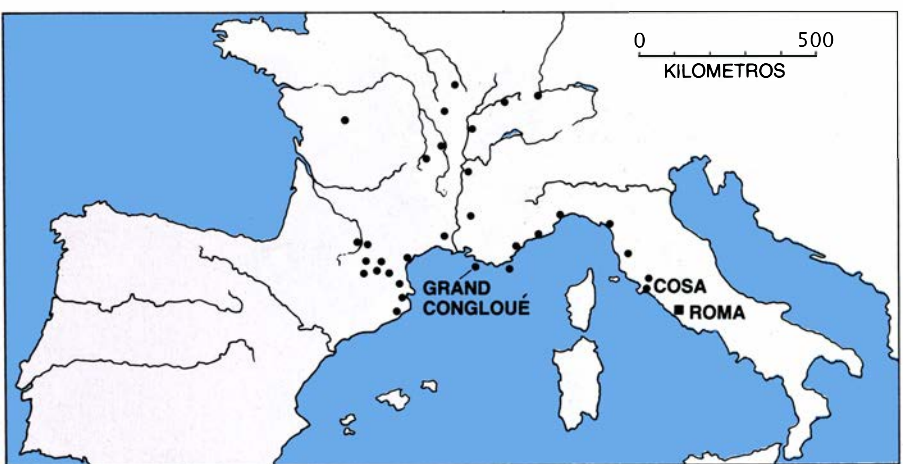
Proyectándose desde la orilla había una fila de tres espigones de hormigón que aún se distinguen sobre el agua en Cosa; otros dos espigones, hoy día sumergidos, descansaban sobre la parte superior del rompeolas. Los espigones, que facilitaban el amarre y la descarga, prestaban también protección a una dársena interior, menor. Estaban fabricados con argamasa de pozzolana, mezclada con trozos de caliza, toba (una roca volcánica) y fragmentos de ánfora. (Su composición, junto con la de otras estructuras de hormigón procedentes de Cosa, fue analizada por Elaine K. Gazda, de la Universidad de Michigan.) La pozzolana es una ceniza volcánica pulverizada; cuando se mezcla con caliza y agua, forma un material que fragua sólidamente y que se fija y endurece al contacto de agua dulce o salada. El descubrimiento de la pozzolana por los romanos en la antigua Puteoli, cerca de Nápoles, en el siglo III o comienzos del II a. de C., les permitió convertirse en los principales constructores de puertos del Mediterráneo antiguo. Los espigones de Cosa constituyen el primer ejemplo conocido de esta tecnología.

Los espigones se alcanzaban a través de un único canal de entrada situado en la punta este del rompeolas principal. El canal tenía una profundidad aproximada de seis metros, altura suficiente para un barco mercante romano de 20 metros de eslora. Estos barcos podrían haber fondeado en la dársena protegida, mientras las embarcaciones más pequeñas serían amarradas en el rompeo-



1. EL PUERTO DE COSA, en la actualidad. Está dominado por un promontorio de caliza. El promontorio, que protegía el puerto y constituía un hito de referencia para la navegación, fue una de las razones para que los romanos establecieran una colonia en Cosa en el año 273 a. de C. Extendiéndose en fila desde la orilla se conservan los restos de tres espigones de hormigón, construidos por los ingenieros de puertos romanos para modificar así el puerto natural.





2. PUERTO DE COSA, centro económico de una colonia romana que se extendía unos 30 kilómetros a lo largo de la arenosa costa tirrena de Italia (*arriba*). La colonia abarcaba la pequeña ciudad fortificada de Cosa, en una colina, con unos 1000 habitantes, y el cercano Puerto de Hércules. En unos 30 yacimientos del Mediterráneo occidental (*puntos en el mapa inferior*) se han encontrado ánforas con la marca de la familia Sestius, que dominó Cosa durante más de dos siglos. La mayor parte de estos yacimientos pertenece a la Galia.

las y espigones o varadas sobre la arena. Es posible que hubiera muelles flotantes desde el rompeolas o la playa. La carga y descarga se realizaba por medio de barcazas y pequeños barcos que faenaban desde la orilla. Habría pescantes amarrados a los espigones para descargar los barcos. Las pequeñas embarcaciones ancladas en aguas someras eran cargadas y descargadas por hombres que accedían a ellas desde la playa, estibadores que llevarían ánforas sobre sus hombros.

Un elemento que normalmente se da por supuesto en los puertos es el faro, pero en la época de apogeo de Cosa el faro era una innovación bastante reciente. Inventado en Alejandría en el siglo III a. de C., los romanos lo convirtieron en un elemento típico de los edificios portuarios. No hay documentado ningún faro en los primeros años de Cosa, pero hemos encontrado testimonios significativos de uno durante el período de auge comercial. Un modelo de faro hecho de terracota, hallado en Vulci y datado a finales del siglo II o primera mitad del siglo I a. de C., ha sido identificado por Paola Zancani Montuoro, de Nápoles, como el faro de Cosa. Ha calculado su altura, que cifra en 30 metros, y su base cuadrada de 5 m. de lado. Parece probable que el faro fuera edificado sobre el Espigón 5, que fue construido sobre el extremo oriental del rompeolas y que está en la actualidad sumergido.

Este conjunto portuario, demasiado amplio para uso particular, estaba sin duda proyectado con propósitos comerciales. No se han encontrado inscripciones que nos indiquen quién lo construyó, controló y se enriqueció en él. La profusión de fragmentos de ánforas descubiertos en nuestras excavaciaones nos proporcionan, sin embargo, alguna información para llenar este vacío. Las ánforas romanas estaban normalmente selladas con la marca del fabricante, por lo que el estudio de los fragmentos de ánforas nos permite conocer quién dominaba el comercio en Cosa. Se han catalogado alrededor de 1000 fragmentos de ánfora, que han sido minuciosamente estudiados por Elizabeth Lyding Will, de la Universidad de Massachusetts en Amherst. Su estudio pone de manifiesto el fuerte predominio de los Sestii en Cosa durante su auge comercial: el 86 por ciento de los sellos de ánforas encontrados en el puerto eran sellos de los Sestii.

Las vasijas a las que pertenecen estos fragmentos constituyeron los principales recipientes de transporte en la Antigüedad clásica. La forma de las ánforas evolucionó por la necesidad de almacenar y transportar cantidades voluminosas de líquidos, frutas y otros alimentos en una vasija suficientemente pequeña para ser cargada por un hombre, ante la necesidad de realizar la carga y descarga sin equipo mecánico. Parece probable que los Sestii tuvieran un alfar para fabricar tales vasijas en Cosa. Los análisis mineralógicos de la tosca arcilla roja de las ánforas de los Sestii, realizados por Raffaello Trigila, de la Universidad de Roma, y Yelle Z. de Boer, de la Universidad Wesleyan, muestran que la arcilla procedía de Cosa. Aunque no se han encontrado restos del alfar, éste se situaba probablemente en la playa, detrás mismo del puerto.

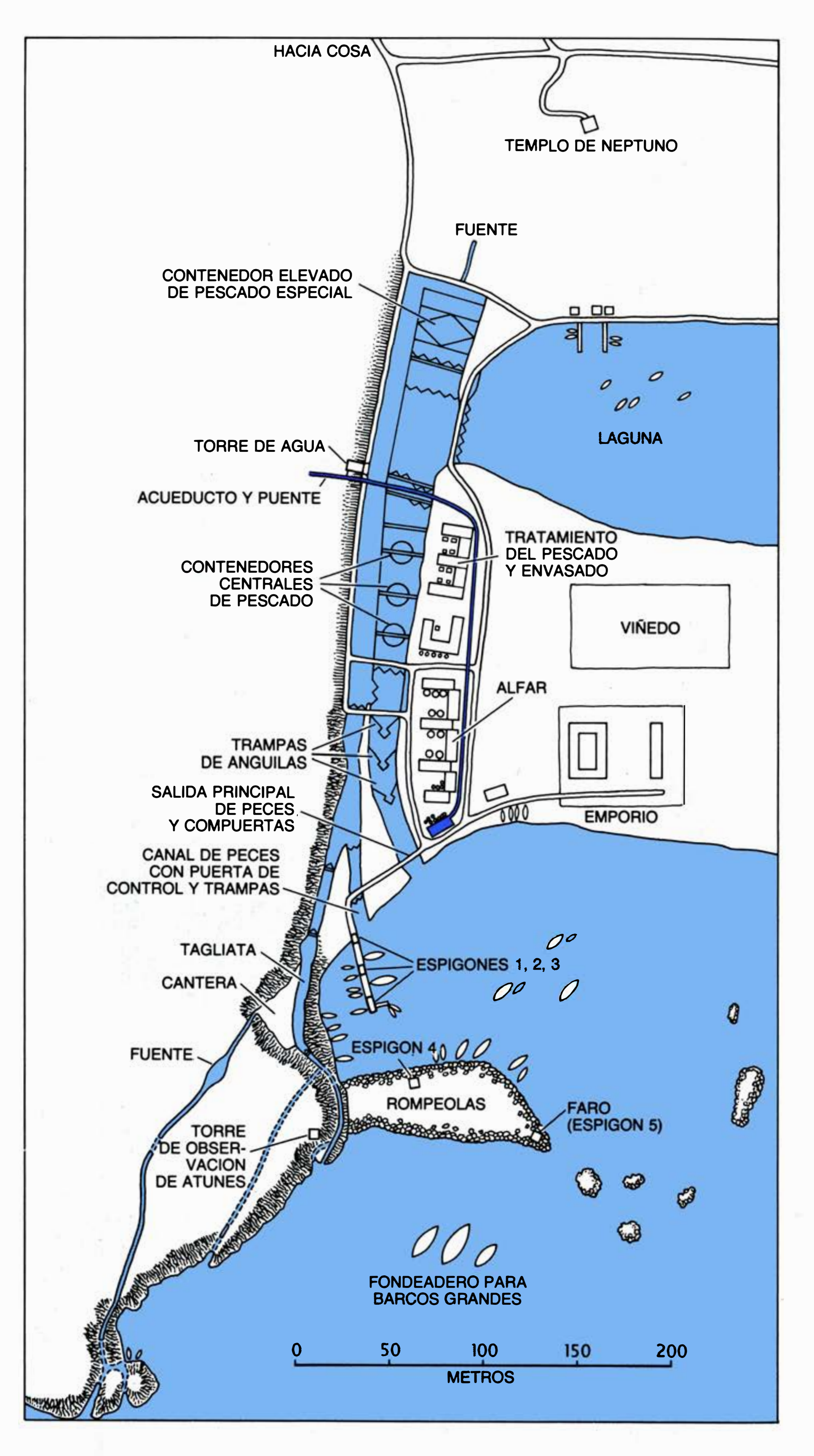
Cosa, con su alfar, fue sin duda el puerto de procedencia de los Sestii. Desde allí, los productos de los Sestii alcanzaban una amplia distribución: se han encontrado fragmentos de ánforas con el sello de los Sestii en más de 30 lugares distintos del Mediterráneo occidental, así como en el Agora de Atenas. Inicialmente la principal exportación era el vino. Las inscripciones pintadas sobre las ánforas indican que

el más importante de los productos de los Sestii era el vino. El estadista romano Cicerón escribe que, además de los barcos, los Sestii poseían una villa en Cosa, la cual podría haber incluido un viñedo. Tal vez allí se elaboraba el vino de mesa que se exportaba por todo el Mediterráneo occidental, especialmente a la Galia. En el viaje de regreso los barcos mercantes traerían como contrapartida metales y esclavos para trabajar en las industrias Sestius.

Entre los yacimientos mejor conocidos donde se han recuperado ánforas con sellos de los Sestii se encuentra el de Grand Congloué, una isla rocosa frente a la costa francesa cerca de Marsella; allí naufragaron dos barcos mercantes romanos. El hundimiento del más alto, excavado por Jacques–Yves Cousteau, ocurrió en torno al año 100 a. de C. –exactamente en el momento de mayor esplendor comercial de Cosa. Su cargamento estaba compuesto por 1200 ánforas de vino Sestius; tal cantidad no podía proceder más que de un alfar del tipo de los que pensamos que hubo en Cosa. Aunque el infortunado barco es conocido desde 1952, su puerto de procedencia no superaba la mera conjetura; ahora parece claro que el mercante se hizo a la mar en el puerto de origen de los Sestii.

Las ánforas del pecio del Grand Congloué ponen de manifiesto que, para acaparar un mercado masivo, los Sestii desarrollaron técnicas de producción en masa. La mayor parte de las 1200 ánforas que fueron halladas en el pecio son de un único tipo, que se denomina tipo Will 4a. Con una altura aproximada de un metro, tenía una capacidad de 26 litros de vino. La forma del tipo 4a, con su largo cuello, altas asas verticales y cuerpo estrecho, se había desarrollado para proporcionar un incremento de capacidad y mayor facilidad de manejo. A finales del siglo II a. de C., era el predominante; junto con el tipo 4b, estrechamente emparentado, constituye el 70 por ciento del material encontrado en el puerto. Es más, las ánforas tipo Will 4 eran las más corrientes de todos los recipientes de vino de época republicana.

Si los métodos de producción a escala industrial y los monopolios tienen una resonancia moderna, a ello contribuyó otro aspecto del comercio Sestius en Cosa: la diversificación. Con los beneficios de su actividad exportadora de vino, estos perspicaces comerciantes se dedicaron también, así parece, al tratamiento industrial de productos pesqueros. El geógrafo antiguo Estrabón



3. EN SU EPOCA DE ESPLENDOR, en torno al año 100 antes de Cristo, el puerto constituía un complejo industrial para la manufactura, envasado y expedición de dos productos principales: vino y pescado tratado. El pescado, procedente de una pesquería lacustre situada en la parte posterior del puerto, se secaba, se escabechaba o salaba; el vino se elaboraba en un lagar próximo al puerto. Ambos productos se envasaban en ánforas fabricadas en los alfares de los Sestii, de Cosa. El puerto contaba con cinco espigones y un rompeolas coronado con un faro de 30 metros de alto. El puerto estaba unido a la laguna por medio de canales artificiales y naturales. Esta y la figura 6 están basadas en dibujos de J. F. Warren, de I. M. Pei Partners.

testifica la existencia de una industria pesquera en la costa de Cosa a finales del siglo I a. de C. Escribe Estrabón que en el promontorio se estableció un observatorio de atunes, uno de los tres que citará a lo largo de la costa del Tirreno. La migración anual hacia el este de ese pez, que dura de mayo a octubre, era esperada con impaciencia, y donde había un observatorio de atunes también existirían los medios para el tratamiento del pescado, una vez que hubiera sido arrastrado a la playa.

No se sabe con exactitud cómo se realizaba el tratamiento de la pesca; tampoco se han hallado restos de la pesquería o de la industria de salazón. No obstante, nuestro descubrimiento de un criadero de pescado en la laguna adyacente indica con claridad que Cosa, además, era en el siglo I a. de C. una pesquería industrial. Hemos encontrado contenedores de hormigón para pescado, de más de 100 metros de longitud, que cubrían aproximadamente una hectárea del extremo occidental de la laguna próxima. La laguna se ha enarenado considerablemente, pero en la Antigüedad se extendía otros 25 kilómetros o más hacia el este. Joanne Bourgeois, de la Universidad de Washington, calcula que en época romana la laguna tendría 800 metros de ancho en su parte más amplia y unos cinco metros de profundidad. Este tipo de barrera de lagunas costeras no se encuentran en ningún otro lugar de Italia, salvo en las proximidades de Venecia, y aún hoy suponen uno de los recursos naturales más ricos de Italia: en la ciudad de Orbetello, cerca de Cosa, funciona una pesquería lacustre moderna.

La laguna, salobre y somera, era rica en vegetación y servía de sustento a una variada vida marina. Con una ligera adaptación podía quedar convertida en un complejo industrial para la cría y captura de pescado. La única modificación esencial consistía en suministrar una circulación continua de agua para controlar la temperatura, los niveles de oxígeno y la salinidad. En los primeros tiempos de la colonia los habitantes de Cosa debieron haber explotado los canales naturales que cortan la larga barrera de arena que separan el mar de la laguna. Aún más favorable para el desarrollo de una pesquería era, sin embargo, el promontorio de caliza, que estaba hendido por fracturas naturales y salpicado de manantiales de agua. Las fracturas se debieron ampliar y mejorar, creando un contacto permanente entre el mar y la laguna.

Una fractura, llamada de Tagliata (cortada), fue específicamente modificada para la pesquería. Este canal, cortado en parte desde la roca firme, serpentea 150 metros para alcanzar el lado sur de la antigua laguna. Su sección por la parte del mar tenía compuertas para controlar el flujo del agua y para servir como tanque donde capturar pescado comestible en sus partes rocosas. En las estaciones más secas, o cuando crecían las mareas, la Tagliata llevaba agua fría del mar (y pescado) a la laguna. Durante el otoño lluvioso y el invierno, en que la laguna estaba llena, la Tagliata conducía el excedente de agua de nuevo al mar. De esta forma, los ingenieros romanos hicieron posible la captura y mantenimiento de pescado en los grandes depósitos de hormigón que podrían haber producido alrededor de 150.000 kilos de pescado al año.



4. EL ESPIGON DE HORMIGON ha aguantado casi 2000 años en el puerto de Cosa. El elemento que fraguaba el hormigón era la pozzolana, una ceniza volcánica descubierta por los romanos en la antigua Puteoli. Cuando se mezcla con cal y agua, el hormigón con mortero de pozzolana fragua y es resistente tanto en agua salada como en dulce. En la capa superior, más clara, la pozzolana se mezclaba con caliza y fragmentos de ánfora. En la capa inferior, más oscura, el mortero se mezclaba con tufo, una roca volcánica que resiste en el agua. Los agujeros alojaban el encofrado que servía como matriz para el hormigón.

De qué tipo de pescado se trataba puede deducirse por las especies capturadas en la moderna pesquería de Orbetello. Los miembros de la familia de las anguilas suponen alrededor del 50 por ciento de la captura. Las anguilas ascienden en primavera y descienden en otoño y comienzos del invierno para desovar una sola vez en aguas profundas. Todavía hoy son capturadas —como lo eran en la Antigüedad— en trampas tendidas a lo largo de la separación entre la laguna y el mar. Otras especies adaptadas al agua salobre son el mújol gris, la lubina, la dorada y el lenguado. El mújol era especialmente estimado por los romanos; las piezas grandes alcanzaban precios desorbitados y con su hígado se hacía cierta salsa de pescado.

Entonces, una parte de esta pesca podía ser consumida por la población local: los habitantes del puerto, de la ciudad y de los caseríos colindantes. Otra parte de esta pesca podría haber sido capturada en barcos especiales equipados con grandes depósitos para conservar vivo el pescado. Sin embargo, antes de la introducción de los métodos de refrigeración, la mayor parte de las capturas debía ser adobada, salada o secada (el pescado elaborado en cualquiera de estas formas era fundamental en la dieta de los romanos durante la Antigüedad). El más famoso y rentable de todos los productos elaborados, sin embargo, era una salsa conocida como *garum*. Elaborado con las tripas de pescado dejadas fermentar al sol, el garum se producía en las pesquerías de salazón como subproducto. Aunque algunas veces se combinaba y bebía como licor, solía consumirse, por lo común, en forma de condimento salado y picante, estando de esta manera presente siempre en la mesa: la autoridad culinaria romana Apicio incluye en su famoso libro de cocina más de 350 recetas compuestas con garum.

El garum no sólo tenía una gran demanda, sino que su elaboración era altamente rentable. El historiador Plinio el Viejo escribe que una ánfora de una variedad de garum alcanzaba incluso hasta diez veces el valor de una ánfora del vino más selecto. En estas condiciones no parece sorprendente que los Sestii se dedicaran a la manufactura del garum. Will ha identificado dos de nuestros tipos de ánforas de finales del siglo II y del siglo I a. de C. hechas específicamente para contener garum; también es posible que alguna otra vasija, inicialmente pensada para



5. ANFORA SESTIUS, del grupo denominado tipo Will 4a, la variedad habitual en Cosa. Con un metro de altura aproximadamente, tenía una capacidad de 26 litros y se destinaba, sobre todo, al vino. Como otras ánforas Sestius, el tipo 4a iba estampillado con un sello Sestius (*derecha*): "SES" y un pequeño emblema —en este caso, el tridente, símbolo de Neptuno, quien no era únicamente dios del agua salada y dulce, sino también la divinidad del puerto. Esta ánfora fue hallada en la colina amurallada de la ciudad de Cosa, en la parte alta por detrás del puerto.

contener vino, fuera utilizada con posterioridad para la costosa salsa de pescado. En cualquier caso, el hallazgo de Cosa es sorprendente, porque se pensaba que el garum no se exportaba desde Italia hasta el siglo I d. de C. e incluso entonces no en cantidades comerciales.

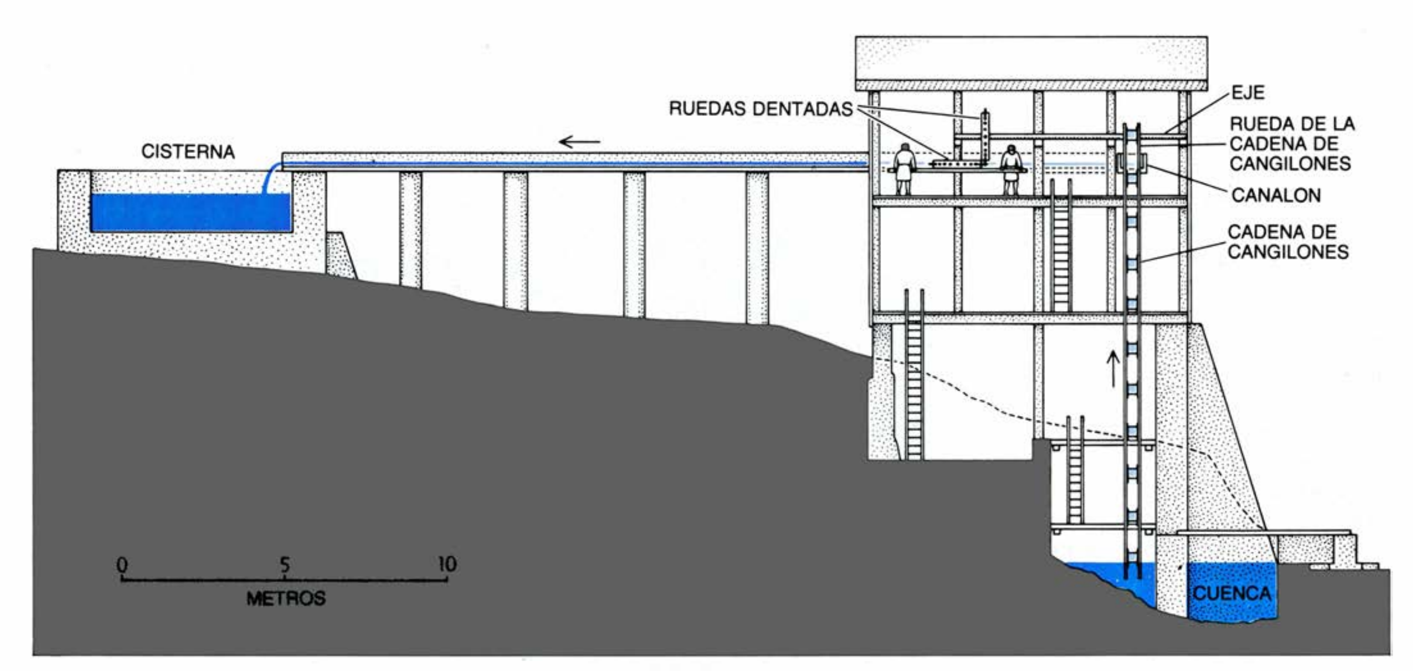
Aunque es lógico suponer que los Sestii estaban efectivamente detrás del complejo de elaboración de pescado, no se puede olvidar que no disponemos de fuentes escritas que lo especifiquen. El material arqueológico, sin embargo, está abrumadoramente a favor de la influencia de los Sestii, sobre todo en la época de mayor auge del puerto. Los Sestii empleaban un símbolo del faro de Cosa en uno de sus sellos de ánfora. La mayoría de los sellos restantes incluían símbolos de Neptuno, tales como el tridente, un timón, una ancla, un anzuelo, una raspa de pescado y una palma. Neptuno, el dios del agua dulce o salada, era también la divinidad del puerto: su templo se erigía sobre la colina situada en la parte posterior de la laguna. Tal vez cuando Cosa se convirtió en municipio (una ciudad compuesta por ciudadanos romanos con autogobierno) en el año 90 a. de C., los Sestii obtuvieron de la ciudad la franquicia sobre los derechos de pesca y del agua de la laguna.

Cualesquiera que hayan sido las disposiciones legales para el control de la pesquería, uno de sus requisitos prácticos esenciales era el abastecimiento de agua potable. Como ya he mencionado, el puerto tiene varios manantiales, pero un uso industrial eficaz del mismo exige que el agua se recoja y llegue hasta los puntos de consumo. Para satisfacer su demanda, los habitantes de Cosa construyeron una torre de agua sobre el mismo manantial que nosotros liberamos durante nuestras excavaciones. Esta estructura sin paralelo, que contenía el equipamiento para elevar el agua desde el manantial hasta un acueducto, era suficiente para abastecer al puerto en su primera época y fue restaurada con posterioridad y usada de nuevo por la gran villa que ocupaba entonces aquel lugar. De todos los descubrimientos que conseguimos durante la excavación, el principal de todos tiene que ver con la torre del agua: piezas de la maquinaria de madera que elevaba el agua desde el manantial.

La primera fase de actividad de la torre de agua comenzó a principios del siglo I a. de C., cuando el puerto se encontraba en su cenit comercial. El proyecto inicial permitía al ingenio subir el agua 5 metros desde el nivel inferior del manantial hasta un depósito colector; de aquí fluía hacia el este sobre un acueducto, atravesaba la laguna y se dirigía al área comercial y al puerto, llevando agua potable que podían utilizar las industrias, barcos y marineros. Al final del siglo I a. de C., la torre del agua quedó abandonada, para ser reconstruida aproximadamente un siglo más tarde, esta vez subiendo 13 metros sobre la ladera inclinada hacia el oeste a través de un acueducto que vaciaba en una gran cisterna.

El segundo complejo de la torre de agua lo destruyó el fuego, a mediados del siglo II d. de C. Afortunadamente, piezas de su maquinaria cayeron dentro del habitáculo que había sobre el manantial, donde se han conservado hasta que las hemos encontrado nosotros, unos 2000 años más tarde. Dado que el diseño del mecanismo de la noria de agua parece no haber experimentado cambios fundamentales durante los 250 años de vida de la torre de agua, los restos nos ayudan a entender los principios de la maquinaria utilizada tanto en la primera fase de la actividad como en la segunda. El trabajo de analizar la maquinaria fue llevado a cabo por John P. Oleson, de la Universidad de Victoria en British Columbia, que excavó la torre de agua y restauró parte de la maquinaria de la noria de agua.

El diseño general de la instalación se basa en dos ruedas con un mecanismo de engranaje de madera, una de ellas en posición vertical y la otra horizontal. Haciendo girar la rueda horizontal (por medio de una barra que se prolonga en su eje) se accionaba la rueda vertical. La rueda vertical estaba unida, a través de un mango, a una tercera rueda, también vertical. Cuando la tercera rueda se movía propulsaba una cadena continua de cangilones que



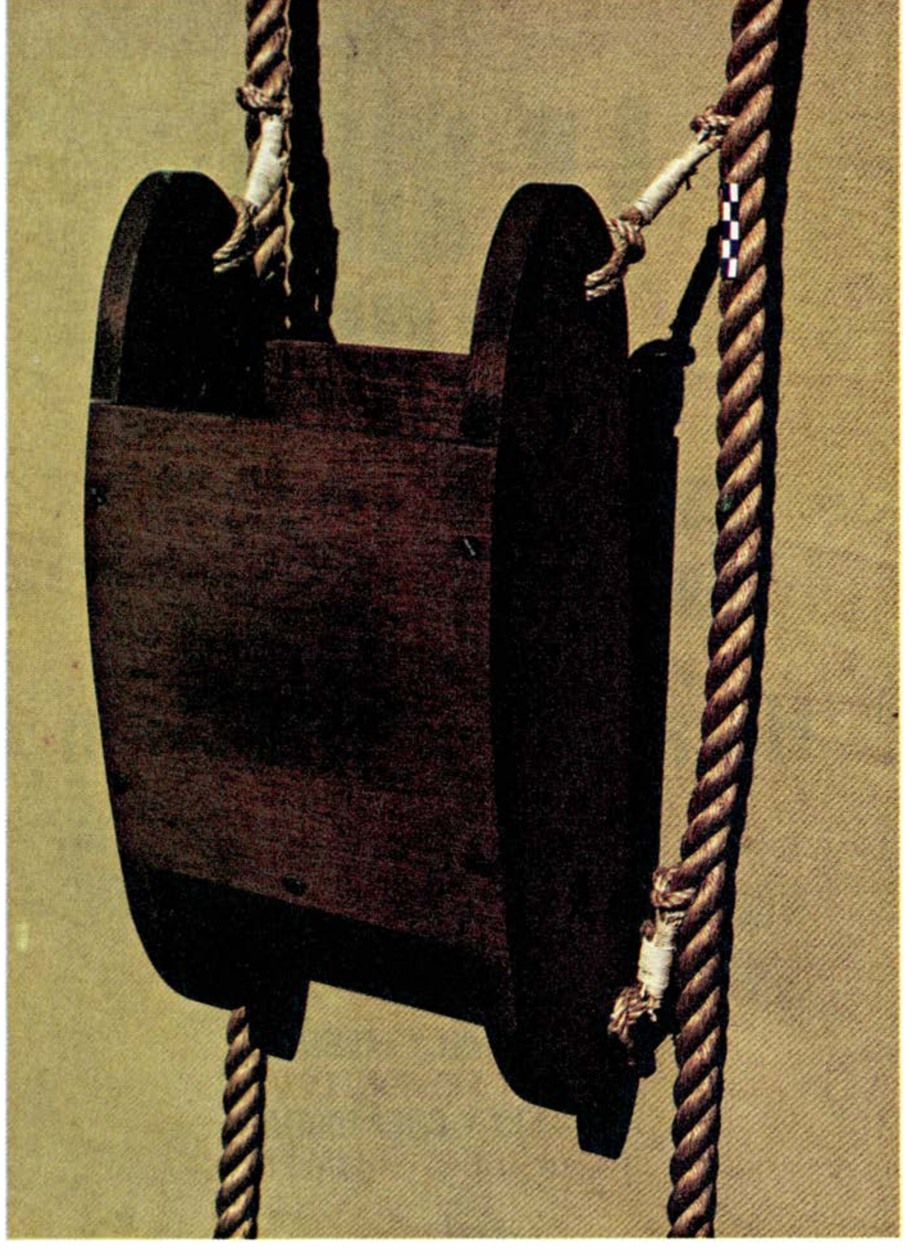
6. TORRE DE AGUA de Cosa para proteger la maquinaria destinada a elevar agua desde un manantial natural. Esta maquinaria probablemente era accionada por un par de esclavos, que empujaban en los extremos de una barra larga. Esta barra hacía girar una rueda dentada horizontal, que ponía en movimiento otra vertical. La rueda vertical estaba unida mediante un eje a una tercera rueda, que elevaba una cadena de 24 cangilones. Cuando pasaban por la rueda de la cadena de cangilones, éstos vaciaban su contenido en un canalón. Desde aquí el agua fluía hacia una cisterna y entonces se distribuía por tuberías de plomo.

elevaban el agua desde el manantial y la vaciaban en un canalón situado por debajo mismo de la rueda de cangilones en cadena. Esta maquinaria, desarrollada probablemente en Alejandría de Egipto, en el siglo III a. de C., se utiliza todavía en algunos lugares del Próximo Oriente, donde recibe el nombre árabe de *saqiya*. Los restos procedentes de Cosa —que incluyen fragmentos de siete cangilones y un radio de la rueda de la cadena de cangilones— constituyen el testimonio arqueológico más antiguo de un mecanismo del tipo *saqiya*.

La torre de agua que alojaba ese ingenio salvaba, en tres secciones, la escarpada ladera situada sobre la laguna. Una plataforma de hormigón se prolongaba hacia la propia laguna. Unida a la plataforma había una cuenca que alejaba unos 17.000 litros de agua con capacidad adicional en caso de desbordamiento. Junto a la cuenca había una estructura sólida que soportaba y protegía el sistema elevador. La cadena de cangilones, según deduce Oleson, constaba de un par de vueltas de cuerda, de 27 metros de longitud cada una, a las que se sujetaban 24 cangilones de madera a intervalos. Los cangilones, cubiertos con pez por dentro y por fuera, tenían cada uno una capacidad aproximada de 7 litros. Una vez que había vaciado su contenido en el canalón colector, el agua fluía hacia la cisterna, desde la cual era transportada a la villa a través de un sistema de cañerías de plomo.

En los sistemas de *saqiya* más modernos, los animales de tiro suministran la fuerza motriz. Las dimensiones de la torre de agua y la dificultad de acceso a lo alto de la estructura que soportaba el mecanismo de empuje en Cosa nos indican que aquí no se utilizaban animales; la cadena era movida por hombres. Esclavos, criminales o prisioneros hacían, probablemente, el trabajo, uno en cada extremo de la barra que movía la rueda giratoria. Oleson ha calculado que dos esclavos tardarían alrededor de 45 horas en llenar la cisterna, que tenía capacidad para 127.000 litros.

Los restos del sistema de la noria de agua de Cosa son únicos. No sólo constituyen los testimonios arqueológicos fechados más antiguos para este tipo de maquinaria, sino que además el mecanismo de Cosa subía el agua desde el nivel del suelo a una altura superior. Todos los demás ejemplos conocidos de la Antigüedad subían el agua desde los manantiales subterráneos al nivel



7. CANGILON DE MADERA, procedente de la torre de agua de Cosa, reconstruido por John P. Oleson, de la Universidad de Victoria en la Columbia Británica. Durante las excavaciones se encontró un cangilón de pino entero y fragmentos de otros seis. Cada uno tenía 54 centímetros de alto y siete litros de capacidad.

del suelo. Pero aún hay más; los cangilones constituyen el único ejemplo fabricado de madera que se conoce de la Antigüedad; todos los demás encontrados son de terracota y están fechados en el siglo III d. de C., o más tarde.

En la época en que se construyó la segunda torre de agua, en la segunda mitad del siglo I d. de C., habían acontecido muchos cambios en el puerto. No era ya el gran centro para la exportación y la industria: se había convertido en un núcleo de importación de bienes de lujo demandados por los ricos propietarios de las villas de la zona. Los barcos mercantes, los marineros y los obreros habían ido desapareciendo junto con el bullicio de la vida portuaria. En su lugar había surgido en la costa de Cosa la gran villa antes mencionada, que podría haber sido propiedad de un emperador. Fuera o no imperial, la villa constituyó una empresa lujosa y probablemente se reconstruyó la maquinaria de la torre de agua para el suministro de su gran terma (estancia habitual en una villa romana).

¿Por qué sufrió el puerto un cambio tan drástico? Varios factores colaboraron en ello. Uno de índole natural. El enarenado, lo dijimos antes, es una de las mayores amenazas en cualquier puerto, y eso resulta especialmente cierto en la arenosa costa tirrena. Las excavaciones de Cosa desenterraron una capa de arena gris de mar que llenaba los canales de pesca extendiéndose incluso hasta la laguna. Bourgeois ha atribuido ese fenómeno a una gran tormenta o maremoto que enarenó el puerto y alguno de los canales de los que dependía la laguna pesquera. Un cataclismo de similares características pudo haber bastado para reducir la actividad comercial del puerto.

Además, a comienzos de la época imperial, en el 27 a. de C., la necesidad de un puerto en Cosa había disminuido considerablemente. El énfasis del comercio romano había pasado de las exportaciones a las importaciones: grano para la creciente población de Roma y productos suntuarios demandados por la corte imperial y la aristocracia. Este tipo de importaciones accedía con mayor facilidad a los puertos del sur, como Puteoli y Ostia, el puerto imperial de Roma. El puerto de Hércules, que no fue anegado por la arena, satisfacía el resto del tráfico local. Por estas y otras razones, a finales del siglo I a. de C., el puerto de Cosa se había convertido en un tranquilo remanso, resurgiendo unos 75 años después como emplazamiento de una suntuosa villa costera. A ello quedó reducida hasta su declive definitivo que (coincidiendo con el declive de todo el mundo romano) tiene lugar en el siglo III de nuestra era cristiana.

Al repasar la historia del puerto de Cosa, uno queda especialmente impresionado por el yacimiento en su época de auge comercial. La jerarquía e integración vertical son reminiscencias de estructuras corporativas mucho más modernas: los bienes manufacturados en el puerto eran embalados allí y embarcados por las mismas personas que tal vez poseían los barcos y controlaban el puerto. Para proporcionar la infraestructura de esta empresa, tuvo que ser importada parte de la más avanzada tecnología del momento (sobre todo para el mecanismo de la noria de agua). El conjunto abrumador de los testimonios indica que la familia Sestius, si no directamente responsable de este desarrollo, sí tuvo al menos un importante papel en ello. Aunque aún está por escribir la historia de los puertos antiguos, sí puede decirse con toda seguridad que el actual comercio internacional tiene sus orígenes en la energía de aquellos que, como los Sestii, cobraron empuje en una ensenada arenosa y un manantial de agua potable del puerto de Cosa.

Juegos de ordenador

Un laboratorio informático doméstico en el que las bolas son gases, líquidos y masas críticas

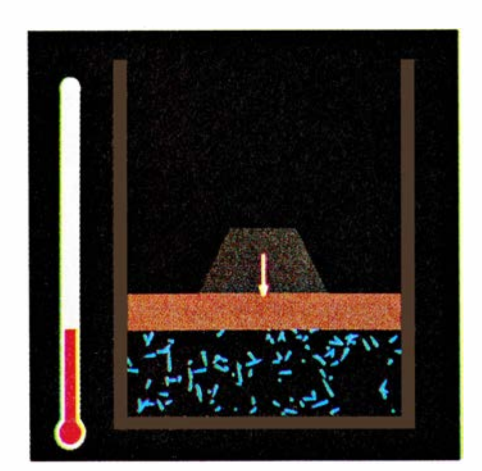
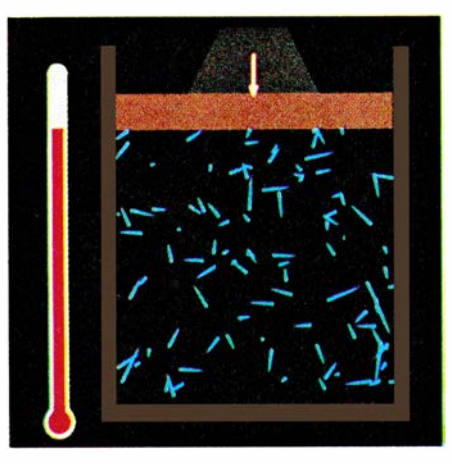
A. K. Dewdney

La pantalla de un ordenador doméstico permite ya contemplar una caja llena de bolas que vuelan en todas direcciones, algo que hasta ahora no podía superar el estadio de modelo especulativo de la materia física. Con un esfuerzo de programación mínimo, los lectores presenciarán las colisiones moleculares responsables de la presión en el interior de un cilindro, o jalearán el aleatorio entrechocar de moléculas de diversos colores conforme un líquido se difunde en otro. Los más intrépidos, a quienes no arredre la posibilidad de que en sus ordenadores se produzca una explosión nuclear, podrán incluso jugar con las masas críticas de un sólido inestable al que llamo "redio".

El tema del paseo informático de este mes se lo debo a James F. Blinn, un afable investigador del Laboratorio de Propulsión a Chorro de Pasadena, California. Blinn ha preparado simulaciones de diversos sistemas físicos. Tales simulaciones se han recopilado en una cinta de vídeo, verdaderamente amena y de lacónica narración, titulada "The Mechanical Universe". Dos simulaciones me atrajeron especialmente como posibles temas para esta sección, a saber, sus encantadoras animaciones de un cilindro lleno de gas y de una cámara de difusión. En el primer caso, unas cuantas docenas de bolas botaban y rebotaban en el interior de un cilindro bidimensional, llevando un pistón lastrado hasta un estado de temblequeante equilibrio. En el segundo caso, bolas de diferentes colores se agitaban de un lado a otro dentro de un recipiente de dimensiones fijas; al principio, los dos colores se hallaban separados, pero la agitación de las bolas de acá para allá, en movimiento browniano, acababa mezclando los dos colores. La tercera de las simulaciones que describiremos aquí, la explosión nuclear, es de mi propia cosecha. La idea nace del deseo primitivo de observar la explosión de una matriz.

Las pocas horas que pueda requerir la preparación de una versión operativa del programa que llamo REBOTES se recuperarán con largueza por la visión de un émbolo lastrado, en equilibrio con una nube de bolas que chocan contra él. En la simulación de Blinn, las bolas chocaban también y rebotaban entre sí; sin embargo, puede lograrse un programa mucho más sencillo e igualmente efectivo haciendo que las bolas se ignoren mutuamente y reboten sólo contra las paredes del cilindro.

El usuario de REBOTES puede especificar el número y la velocidad de las bolas. La posición que adoptará el pistón viene dada por la ley de los gases perfectos: $PV \propto T$, según la cual el producto de la presión P y el volumen V de un gas confinado en una cámara es proporcional a su temperatura absoluta T. La velocidad molecular, especificada por el usuario, equivale a seleccionar una temperatura; el peso con que se carga el pistón determina la presión. ¿Cuál será el volumen resultante? La respuesta se representa en la pantalla del ordenador [*véase la figura 1*]. Cuanto más se eleva la temperatura del gas, tanto más se eleva el pistón.

1. Incremento de volumen debido a la elevación de la temperatura en la simulación de James F. Blinn

Vale la pena estudiar la trayectoria que sigue una bola en sus rebotes contra las paredes antes de plantearse el problema con un puñado de ellas. Imaginemos, pues, una caja rectangular dibujada en la pantalla de nuestro ordenador. La caja, de 50 unidades de lado, contiene una bola en algún punto de su interior. Dado que nuestra simulación va a hacerse en el plano, daremos a la bola dos coordenadas de posición, x e y. La bola tendrá dos componentes de velocidad, v_x y v_y. En un período de tiempo pequeño, de t unidades, la bola se trasladará desde la posición (x,y) hasta la posición $(x + t \cdot v_x, y + t \cdot v_y)$.

El cilindro dibujado por REBOTES, igualmente bidimensional, tiene tres paredes fijas, definidas por las rectas $x = 0$, $x = 50$ e $y = 0$. Una cuarta pared representa al émbolo. La recta de éste se ajusta a la ecuación $y = h$, siendo h la altura actual del pistón. Ningún programa de animación de las bolas podrá eludir la necesidad de establecer cuándo y cómo chocará contra las paredes una bola dada. REBOTES realiza esa tarea contrastando la dirección actual que sigue la bola con cada una de las cuatro ecuaciones: ¿en qué punto interseca la recta de dirección a cada una de las cuatro paredes? La mitad izquierda de la figura 5 proporciona las respuestas.

En cada caso, el valor de t que allí figura da el tiempo (contado a partir del presente) que tardará la bola en hacer impacto contra la pared de que se trate. El verdadero punto de impacto se calcula sustituyendo el valor de t en sencillas fórmulas de posición. En el caso de que el valor de t sea negativo, la bola, de proseguir en su dirección actual, no chocará nunca contra la pared, porque dicho signo indica que se está alejando de ella. Si el valor de t es infinito, una de las componentes de velocidad de la bola tiene que ser 0. Tampoco en este caso llegará la bola a hacer impacto en la pared. Como es natural, REBOTES se salta el cálculo del valor de t en ambas situaciones.

La pared que tenga asociado el mínimo de los valores no negativos de t

será la primera contra la que chocará la bola. Puede utilizarse ese valor de t para calcular el punto donde realmente hará impacto la bola. Lo mismo que antes, será de gran ayuda una pequeña tabla [*véase la mitad derecha de la figura 5*].

Casi todos los programas de simulación sacan partido de una de las dos técnicas de que se dispone para hacer avanzar el imaginario cronómetro conocido por reloj de la simulación. En la técnica de "cuantos" de tiempo, el reloj avanza a pequeños incrementos fijos, actualizando de manera uniforme todos los fenómenos mostrados. En la técnica de "suceso crítico" se hace avanzar el reloj hasta el primer acontecimiento de interés. Tal vez recuerden los lectores el programa de simulación de cúmulos estelares presentado en esta sección en marzo de 1986. El aspecto que ofrecía el cúmulo se actualizaba avanzando un cuanto temporal de unos pocos años. En REBOTES resulta más natural el método del suceso crítico, en el cual se dice que tiene lugar un acontecimiento cuando rebota una bola en alguna de las paredes.

En la técnica del suceso crítico reviste importancia crucial una matriz llamada *suceso*. Cuando REBOTES se dedica a hacer malabarismos con n bolas, es necesario que sepa qué bola chocará en primer lugar contra una pared. La tabla es en realidad una cola de prioridad. Así funciona REBOTES:

repetir
1. tomar instante, bola y pared correspondientes a *suceso*(1)
2. actualizar el sistema en el tiempo
3. determinar el suceso siguiente para bola
4. insertar tiempo, bola y pared en *suceso*
5. presentar el sistema en el nuevo estado

hasta la pulsación de una tecla

Este ciclo de cinco etapas se repetirá hasta que el especialista en informática doméstica pulse una tecla; en el número de febrero de 1988, que estuvo dedicado a efectos especiales, se explica sucintamente el uso de las teclas para ese fin.

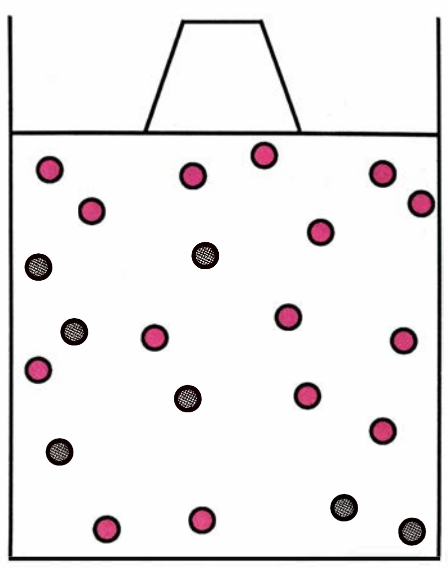
El paso 1 es francamente sencillo. La cola de acontecimientos consta en realidad de tres tablas: *suceso* memoriza los tiempos que faltan hasta los acontecimientos próximos, en el orden en que ocurrirán; una tabla llamada *bola* conserva los índices de las bolas que corresponden a esos acontecimientos, y otra tabla llamada *pared* conserva los índices de las paredes correspondientes. Así, por ejemplo, *suceso*(2) contiene el tiempo que ha de transcurrir hasta el segundo acontecimiento, y *bola*(2) contiene el número de la bola b correspondiente; *pared*(2) alberga el número de la pared p, que puede tomar uno de estos cuatro valores: 1 ($x = 0$), 2 ($x = 50$), 3 ($y = 0$), o 4 ($y = h$). El paso 1 contiene, pues, tres instrucciones para colocar los tres elementos de información en las variables t, b y p.

El paso 2 (actualizar el sistema) supone cambiar la posición de todas las bolas de la caja. Dicha tarea puede efectuarse en el interior de un bucle de la siguiente forma:

para $i \leftarrow 1$ hasta n
  $x(i) \leftarrow x(i) + t \cdot v_x(i)$
  $y(i) \leftarrow y(i) + t \cdot v_y(i)$
si $p = 1$ o $p = 2$ entonces $v_x(b) \leftarrow -v_x(b)$
si $p = 3$ o $p = 4$ entonces $v_y(b) \leftarrow -v_y(b)$

Los lectores reconocerán las fórmulas de posición introducidas con anterioridad. No hay peligro de que alguna bola acabe fuera de la caja, porque en el instante t, la que más llega a acercarse al exterior se encuentra en una pared, y no atravesándola. Las dos sentencias condicionales (si... entonces...) se encargan de resolver el rebote de la bola b. Si la bola choca contra cualquiera de las dos paredes verticales, su invierte el sentido de su componente de velocidad en la dirección del eje x; cuando rebote contra una pared horizontal habrá que invertir su componente vertical de velocidad. Actualizar el sistema comporta también decrementar todos los tiempos almacenados en la matriz de sucesos. Para ello, el programa REBOTES se limita a restar t a cada elemento de la matriz.

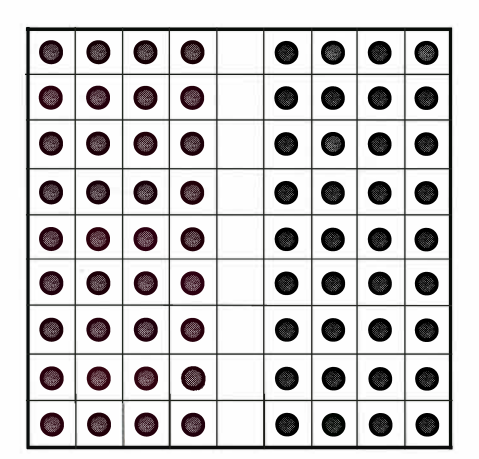
Implícitamente he descrito ya el paso 3, a saber, la determinación del acontecimiento siguiente de la bola b. Lo describiré seguidamente con mayor detalle:

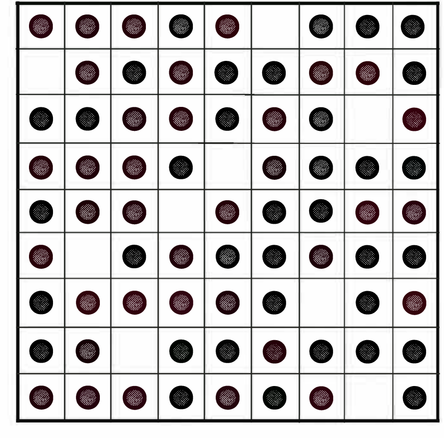


2. *Esquema de una cámara de presión*

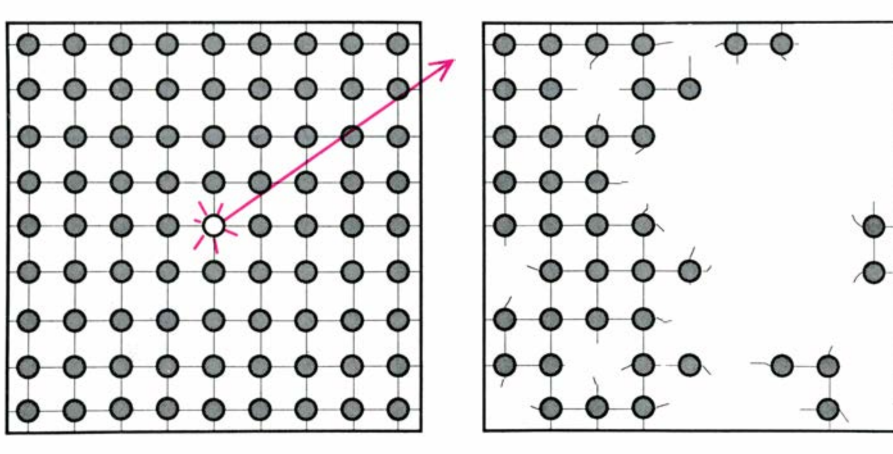
si $v_x(b) = 0$ entonces $t_1 \leftarrow 5000$
  $t_2 \leftarrow 5000$
en caso contrario $t_1 \leftarrow -x(b)/v_x(b)$
  $t_2 \leftarrow (50 - x(b))/$
  $/v_x(b)$
si $v_y(b) = 0$ entonces $t_3 \leftarrow 5000$
  $t_4 \leftarrow 5000$
en caso contrario $t_3 \leftarrow -y(b)/v_y(b)$
  $t_4 \leftarrow (h - y(b))/$
  $/v_y(b)$

El tiempo que falta para el impacto de la bola b contra cada una de las cuatro paredes está codificado en cuatro variables, t_1 a t_4. En el caso de que la bola b, al proseguir en su sentido y dirección actuales, no pudiera hacer impacto contra una de las paredes, se le asignaría a la variable el desmesurado valor de 5000. Seguidamente, una especie de criba computacional aísla la pared contra la que debe chocar la bola b. REBOTES empieza por igualar t a 5000, para luego ensayar por turno los tiempos, de t_1 a t_4. El ensayo consta de tres partes: si t_i es menor que t; si t_i es mayor que 0 y si *pared*(b) no es igual a i,





3. *Difusión de dos líquidos en una matriz de 9 por 9*



*4. Una muestra de redio antes (**izquierda**) y después (**derecha**) de una reacción en cadena*

entonces el programa remplaza el valor actual de t por t_i, y p por i.

En la cuarta fase, REBOTES regenera las colas de los sucesos. La tarea principal consiste en determinar en qué cola se hallará el siguiente rebote de la bola b, lo que se resuelve fácilmente:

```
k ← 2
mientras suceso(k) < t
   suceso(k − 1) ← suceso(k)
   bola(k − 1) ← bola(k)
   pared(k − 1) ← pared(k)
   k ← k + 1
suceso(k − 1) ← t
bola(k − 1) ← b
pared(k − 1) ← p
```

Aquí, REBOTES revisa la cola entera de sucesos, en busca de la asignación que corresponde ahora a la bola b. Mientras busca, desplaza los elementos de las tres tablas una casilla hacia la izquierda. Tan pronto encuentre una casilla k en la cual *suceso*(k) no es menor que t, es obvio que el tiempo hasta el próximo impacto corresponde a la casilla precedente, k. (Cuando a las bolas del cilindro se les dan sus velocidades y posiciones iniciales, es preciso configurar también la cola de sucesos. Para evitar el esfuerzo de programación que ello supone, pueden seleccionarse a mano las posiciones y velocidades y calcularse los tiempos de los sucesos. Seguidamente, se procede a cargar en las tablas de colas de sucesos los valores iniciales.)

El último paso requiere que REBOTES muestre el rectángulo correspondiente al cilindro y dibuje las bolas en sus posiciones actuales. Operación, muy fácil, que tiene que complementarse con el borrado de las bolas de sus posiciones anteriores.

Cuando arranca, REBOTES pregunta al usuario a qué velocidad habrán de viajar las bolas. Sea v tal variable. El programa selecciona entonces al azar n números comprendidos entre $-v$ y v y los guarda en la tabla de componentes de velocidad paralelas al eje x, $v_x(i)$. Las componentes de la velocidad paralelas al eje de ordenadas se calculan después mediante el teorema de Pitágoras, a saber, la raíz cuadrada de $v^2 - v_x^2(i)$. Se sugiere a los lectores que ensayen con distintos valores de la velocidad v en el intervalo de 1 a 10.

Como es natural, quienes preparen el programa REBOTES querrán observar el sube y baja del pistón lastrado en respuesta a la presión intermitente que se ejerce desde el interior del cilindro. A tal objeto, el paso 2 debe incluir un cálculo que reste el movimiento descendente del pistón debido a la gravedad de su desplazamiento ascendente causado por la transferencia de momento cinético desde una bola. Se obtiene así una nueva altura, h.

En pos de la máxima simplicidad, la interacción de las bolas con el pistón se ha distorsionado hasta convertirla en pura trapacería. En el tiempo t, el pistón cae $t^2/100$ unidades. Cuando una bola provista de componente vertical de velocidad v_y hace impacto en el pistón, éste asciende $v_y/100m$ unidades. Pido disculpas a los físicos, ¡pero funciona! Los usuarios de REBOTES tienen que proporcionar al programa la masa m del pistón, así como el número de bolas n y su velocidad, v.

El programa de difusión que llamo MEZCLA trata las moléculas de un líquido como bolas que sólo avanzan a razón de un paso vertical u horizontal por vez. Una tabla de 31 por 31, llamada *tanque*, contiene 930 bolas, dispuestas de partida más o menos como los peones del juego de damas. MEZCLA es todavía menos realista que REBOTES, pero también funciona. Las bolas de la mitad izquierda son de color rojo y, las de la mitad derecha, gris [*figura 3*].

MEZCLA procede seleccionando al azar una posición de la tabla y eligiendo después, igualmente al azar, una posición adyacente. Si la primera posición está ocupada por una bola y no hay ninguna en la segunda, se borra la bola que ocupa la primera posición y se dibuja en la nueva. Si en la posición inicial no hay bola, o si la hay en la segunda, MEZCLA se desentiende olímpicamente. Con tiempos de microsegundos entre las manos, antes o después aparecerá alguna bola desplazable. ¿Cuánto tardarán esos dos estilizados líquidos en alcanzar la difusión completa? No daremos la descripción algorítmica entera de tan recreativa tarea. Los lectores habrán de valerse de sus propios recursos, tanto materiales como intelectuales.

Con prisa y sin pausa me apresuro a entrar en el asunto del redio, elemento transuránido violentamente inestable. Los átomos de este elemento se desintegran espontáneamente, emitiendo un neutrón en el proceso. Se me viene a la mente una famosa demostración de Walt Disney. Aquel gran hombre llenó en una ocasión todo un gimnasio con trampas para ratones. El brazo destinado a masacrar los pequeños roedores estaba amartillado y cargado con una pelota de ping-pong. Con sonrisa malévola, Disney lanzó una sola pelota de ping-pong al suelo del gimnasio. En menos de un segundo, el aire literalmente se llenó de millares de bolas; se escuchó un extraño rugido. Fue, quizá, la más segura de las reacciones en cadena que jamás haya tenido lugar.

Ocurre que el redio es un cristal. Sus átomos están dispuestos cual bolitas de una red —una matriz cuadrada— de $n + 1$ bolas de lado. Cuando el lector da la señal, la bola central se desintegra, emitiendo un único neutrón que sale disparado en línea recta a través de la

PARED	VALOR DE t
1: $x = 0$	t_1: $-x/v_x$
2: $x = 50$	t_2: $(50 - x)/v_x$
3: $y = 0$	t_3: $-y/v_y$
4: $y = h$	t_4: $(h - y)/v_y$

PARED	PUNTO DE REBOTE
1: $x = 0$	$(0,\ y + t_1 \cdot v_y)$
2: $x = 50$	$(50,\ y + t_2 \cdot v_y)$
3: $y = 0$	$(x + t_3 \cdot v_x,\ 0)$
4: $y = h$	$(x + t_4 \cdot v_x,\ h)$

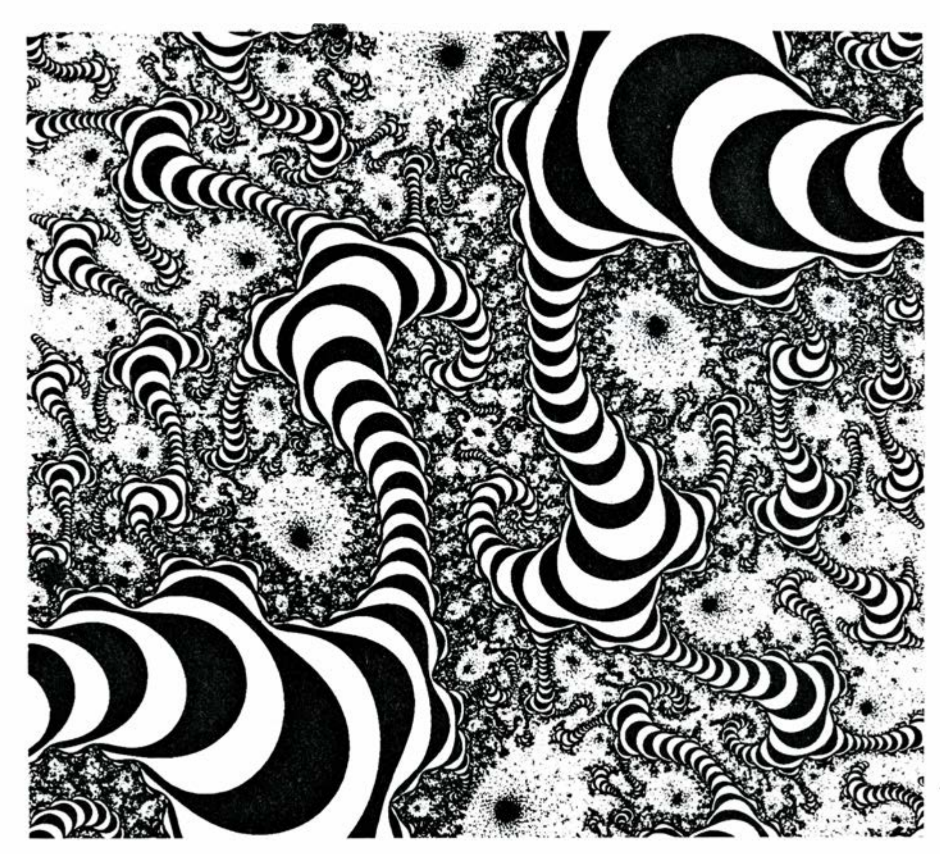
*5. Tablas para calcular el instante (**izquierda**) y lugar (**derecha**) de las colisiones*

matriz, en dirección determinada por el azar. Cuando el neutrón alcanza otra bola, ésta se desintegra. ¿Llegará a producirse una reacción en cadena? Si la matriz es pequeña, lo más probable es que la reacción fracase. Conforme aumenta el tamaño de las matrices, tanto más probable es que detonen con un silencioso rugido [*véase la figura 4*]. ¿Y cuánto mayor ha de ser? Esa es la tarea que se les ha encomendado al investigador domiciliario. No cabe duda de que hasta un microordenador habría descargado muchísimo trabajo en Los Alamos, allá por 1944.

En esta sección no hay secretos militares. Tendré mucho gusto en informar de los valores de las masas críticas de redio que vayan descubriendo aquellos lectores suficientemente osados para realizar el experimento. El programa, al que he llamado BOOM, se vale de la matriz *red*. Dado que la mayoría de los lectores no podrán utilizar matrices de tamaño variable, he optado por tomar *red* de tamaño 50 por 50. Cuando el usuario proporciona un valor de n, BOOM limita sus operaciones a las primeras n filas y columnas de *red*. Serán éstas las que contengan los átomos, a razón de uno por casilla. Tanto al objeto de presentación en pantalla como de cálculo, los átomos de redio tienen radio unidad y la distancia interatómica de la red cristalina es de seis unidades. Conviene que el átomo que ocupa la posición (i,j) de la matriz tenga coordenadas $(6i,6j)$.

Al desintegrarse un átomo de redio, BOOM selecciona al azar un ángulo a y calcula el seno y el coseno de ese ángulo, almacenando los valores en las variables s y c. Si el átomo desintegrado tiene coordenadas (x,y), este punto y el ángulo determinarán una recta. La cuestión clave es, "¿A qué distancia de otro átomo de coordenadas (u,v) pasará la recta?" La respuesta viene dada por la fórmula $(u-x)^2+(v-y)^2-[(u-x)\cdot c+(v-y)\cdot s]^2$. La fórmula expresa el cuadrado de la distancia entre el punto (u,v) y el más cercano a él de los puntos de la recta en cuestión. En lugar de molestarse en buscar la raíz cuadrada del número resultante, BOOM se limita a verificar si el número anterior es menor o igual que 1. En caso afirmativo, el átomo situado en (u,v) se fisiona.

Cada vez que uno de los átomos de *red* hace explosión de esa forma, BOOM da comienzo a un bucle que, sistemáticamente, introduce en la fórmula anterior la totalidad de las n^2 coordenadas u y v y omite las del átomo recién desintegrado. Todos los átomos que deban fisonarse en la fase siguiente se añaden a una lista, contenida en una tabla que llamaremos *fisión*. Un índice, *fisionados*, separa los átomos ya fisionados de los pendientes de hacerlo. Un segundo índice, *fin*, señala el final de la lista. Cada vez que hace explosión un nuevo átomo, se añaden a la lista todos aquellos que el neutrón intercepta en su trayectoria y se incrementa correspondientemente el índice *fin*. Una vez determinados todos esos átomos, el índice *fisionados* se incrementa y reanuda el ciclo. Cuando fisionados iguala a *fin*, el valor común de esos índices nos da el número de átomos que intervinieron en la reacción en cadena. ¿Para qué valor de n se desintegrará la matriz entera? Las fluctuaciones estadísticas de la respuesta no serán excesivas.



6. Contribución de James E. Loyle a la galería Mandelbrot

Nuestro espacio está limitado y habrá de bastar esa descripción del programa BOOM. Puede acoplarse a BOOM una rutina de presentación gráfica, pero no es preciso realizar tan gran esfuerzo para hallar la respuesta. No obstante, procuraré publicar la más interesante de la figuras de matrices a medio reventar que se me envíen. El valor de n que represente se hallará muy cercano a la masa crítica.

El pasado mes de enero visitamos de nuevo en esta sección el conjunto de Mandelbrot, y presentamos una miríada de primos suyos, todos ellos apellidados Julia en honor del matemático francés Gaston Julia, uno de los más distinguidos investigadores de los sistemas dinámicos. Los programas que generan conjuntos de Julia son tan sencillos como los que engendran el conjunto de Mandelbrot. Consiguientemente, han sido centenares, millares tal vez, los lectores que han preparado programas al efecto, o les gustaría hacerlo. Los lectores que aspiren a profundizar más en esta materia pueden suscribirse a un boletín fractal (por su contenido, no por su presentación) llamado *AMYGDALA*. Se haya repleto de indicaciones de programación para obtener conjuntos de Mandelbrot y otros conjuntos fractales. El boletín proporciona igualmente direcciones de programadores dispuestos a compartir o vender programas al efecto. Los interesados pueden escribir al editor, Rollo Silver, un aficionado al Mandelbrot, localizable en Box 219, San Cristobal, N.M. 87564, Estados Unidos. Silver también vende diapositivas.

Al final del artículo de enero presenté un monstruo tridimensional, que era en realidad una sección transversal tridimensional de un conjunto de Mandelbrot de cuatro dimensiones. Heinz-Otto Peitgen, el matemático y artista, de Alemania Federal, ha revelado la fórmula aplicada para generar el conjunto de cuatro dimensiones. Se itera la ecuación $z \leftarrow z^3 - 3a^2z + b$, donde a y b son sendos parámetros complejos.

¿Cuáles son los puntos que desempeñan el papel especial de $z = 0$ en el conjunto de cuatro dimensiones? Aparecen en realidad dos candidatos, a saber, $z = +a$ y $z = -a$. Por consiguiente, no hay uno, sino dos conjuntos de Mandelbrot tetradimensionales.

Gary Teachout, de Everett, Washington, escribe explicando que el conjunto de Mandelbrot y los de Julia le parecen secciones transversales de un mismo conjunto de cuatro dimensiones, pero su conjunto tetradimensional no se corresponde con ninguno de los de Peitgen. La fórmula fundamental de iteración, $z \leftarrow z^2 + c$, genera un conjunto de Mandelbrot si z permanece fijo y se hace variar a c. Produce un conjunto de Julia si se fija c y se hace variar a z. Pero z y c definen, entre ambos, cuatro dimensiones reales, pues cada número complejo tiene 2. Este superconjunto emerge al "apilar" la totalidad de los conjuntos de Julia, pero no en una pila unidimensional, sino bidimensional. M. G. Harman, de Camberley, Inglaterra, también postuló la existencia de ese mismo objeto.

Se concede a Winston D. Jenks, de Stamford, Connecticut, el premio a la mejor iniciativa tetradimensional. No satisfecho con los números complejos ordinarios, Jenks ha inventado los suyos propios, números de cuatro componentes reales. Se asemejan éstos a los cuaternios, complicado sistema de números ideado por los matemáticos del siglo pasado y que todavía se utilizan en física. Jenks me ha enviado una representación tridimensional de su sólido, que consiste en una serie de 29 secciones transversales.

Por supuesto, los lectores deseosos de generar imágenes del conjunto de Mandelbrot quieren también que ello les ocupe el menor tiempo posible; además de imágenes, el proceso de iteración suele favorecer la aparición de uñas roídas. Dick Holt, de Silver Spring, Maryland, ha descubierto que la velocidad se incrementa en alrededor de un 8 por ciento evitando la rutina de elevación al cuadrado de su sistema de programación. La multiplicación directa (el cálculo de x por x) resulta más rápida que la elevación al cuadrado.

Finalmente, la ilustración de la figura 6 constituye una nueva aportación a la creciente galería de Mandelbrot que estamos montando. La imagen la envió James E. Loyless, de Lilburn, Georgia. El equipo con que la obtuvo recuerda los bólidos de Le Mans: un "turbo-clónico XT reforzado con coprocesador matemático 8087 e impresora Toshiba 321 de 24 agujas".

Taller y laboratorio

Algunas nociones de física para triunfar en la bolera

Jearl Walker

En el juego de bolos americano, cada jugador lanza una bola maciza por una pista larga y estrecha, el callejón, con el propósito de derribar los bolos colocados al final de la misma en formación triangular. La bola golpea algunos y éstos, a su vez, chocan contra los demás en una especie de reacción en cadena, ya sea directamente, ya sea tras rebotar en las paredes laterales o en la del fondo. Por cada bolo derribado el jugador se anota un tanto. Si caen todos se dice que la jugada es un *strike*, y entonces el jugador, además de anotarse 10 tantos, goza de otra oportunidad de volver a puntuar una vez levantados los bolos. En cada turno de lanzamiento un jugador puede apuntarse hasta 30 tantos. Pero si el primer lanzamiento no fue un *strike*, al jugador sólo le queda una posibilidad más para derribar los bolos restantes (y conseguir un *spare*), acabándosele el turno. Lo mejor es, pues, lograr un *strike* en el primer intento.

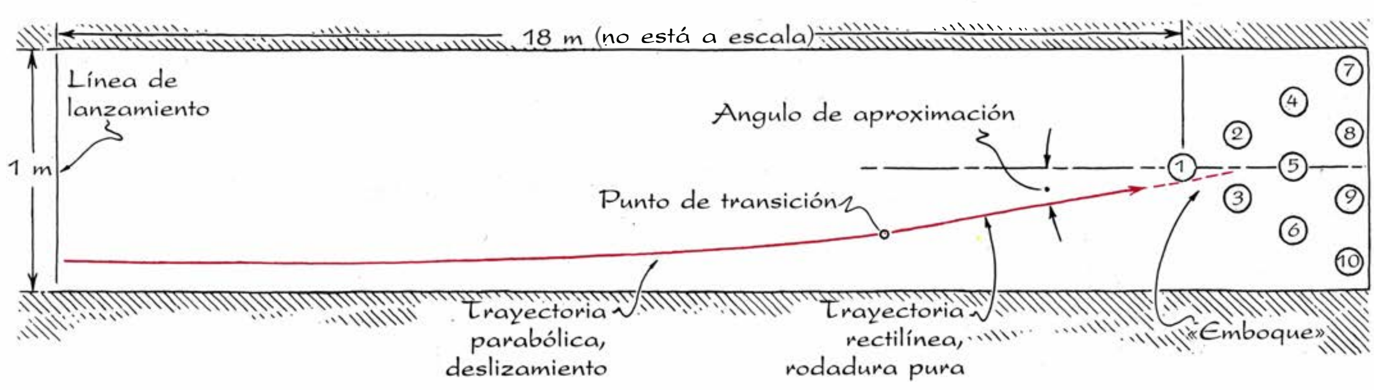
¿Cómo hay que lanzar la bola para aumentar las posibilidades de hacer *strike*? Muchos principiantes sueltan la bola cerca del centro del callejón, enviándola en línea recta hacia el bolo más adelantado. Pero esos tiros corren a la ventura: el bolo se halla muy lejos y resulta difícil acertarle; además el comportamiento de los bolos resulta, al parecer, impredecible. A pesar de todo, a veces suena la flauta y se consigue un *strike*. Los jugadores expertos acostumbran a adoptar una estrategia más segura. No se fijan en los bolos sino en unas señales que hay pintadas a unos cinco metros callejón abajo. Y le comunican a la bola un efecto lateral en el momento de soltarla. La bola así lanzada se mueve paralelamente al lateral del callejón durante un corto tiempo, pero de repente enfila el primer bolo, acercándose bajo lo que parece un ángulo grande. El objetivo, que llamaremos emboque, es el costado izquierdo o derecho del bolo más adelantado.

Los jugadores avezados afirman rotundamente que si la bola lleva efecto lateral aumenta la posibilidad de *strike*. Quizá tengan razón. Pero como este juego se halla sometido a tantas variables es difícil comprobar experimentalmente su tesis. Por eso preferí someter a prueba su plausibilidad, respondiendo a varias preguntas. ¿Por qué produce una trayectoria curva el efecto lateral? ¿Vira la bola en algún punto en particular de su trayectoria? ¿Por qué una aproximación oblicua a los bolos aumentaría la probabilidad de *strike*? ¿Es ese ángulo de aproximación tan grande como pretenden algunos jugadores?

La cabecera del callejón está marcada con una raya, la línea de *foul*, que los jugadores no deben traspasar ni pisar al lanzar la bola. El bolo más adelantado se encuentra a unos 20 metros de esa raya. Los bolos, de madera, miden unos 35 centímetros de altura, no pesan más de 1,6 kilogramos y están numerados según su posición. La distancia entre los centros de dos bolos contiguos cualesquiera es de unos 30 centímetros. Sus secciones transversales son circulares, de un diámetro máximo no superior a siete centímetros y medio.

La bola, cuyo peso puede llegar hasta poco más de siete kilogramos y de diámetro inferior a los veintidós centímetros, posee tres agujeros en los que se introducen el pulgar y dos dedos más. (Dentro de la bola se disponen ciertos pesos que compensen la masa perdida en los agujeros.) Su superficie es de plástico o de caucho duro. Para lanzarla, primero se la hace bascular hacia atrás, y avanzando enérgicamente hacia la línea de *foul*, se propulsa hacia adelante de manera que realice un movimiento pendular, asiéndola de modo que los dedos apunten hacia atrás, con la palma hacia abajo. Conforme se acerca a la raya el jugador se encoge, deslizándose con una pierna hacia atrás para que la bola pierda altura. Cuando la bola llega al punto más bajo de su balanceo, o un poco después, se suelta.

El callejón, cuyo piso está construido con listones de madera, tiene una anchura de un metro; dos canales lo flanquean en toda su longitud. Parte del piso está engrasado, por lo que inicialmente la bola resbala más que rueda



1. Callejón y trayectoria de una bola

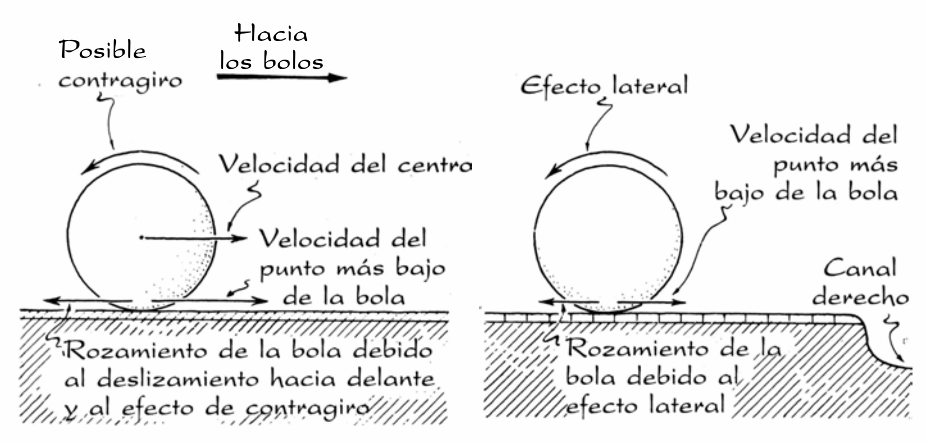
sobre el suelo. El tramo engrasado del callejón varía de una bolera a otra. En Tuxedo Lanes, de Cleveland, que es mi preferida, engrasan el primer tercio de la longitud total de cada callejón, salvo unas estrechas franjas que bordean los canales.

Los primeros que estudiaron matemáticamente la trayectoria curva de la bola fueron Don C. Hopkins y James D. Patterson, de la Escuela de Minas y Tecnología de South Dakota, en 1977. Simplificaremos su tratamiento y además nos ceñiremos al caso de un jugador que use la mano derecha y lance la bola recta hacia adelante por el lado derecho de la calle. En el momento de soltarla, mueve hábilmente los dedos subiéndolos por el costado derecho de la bola; así le comunica un giro de sentido antihorario. La bola, que se va deslizando por la calle, se encuentra sometida a dos fuerzas de rozamiento. Una de éstas apunta hacia atrás y se opone al movimiento hacia adelante. La otra fuerza, que apunta hacia la izquierda, se opone a la rotación de la bola. La aceleración hacia atrás retarda su avance; la aceleración hacia la izquierda la aleja del canal paralelamente al cual se deslizaba en su origen.

Consideremos la bola desde la perspectiva del canal. Si el jugador imprime a la bola un efecto que le haga girar hacia atrás (cosa que podría hacerse), su parte inferior llevará una velocidad hacia adelante mayor que la del centro; si no es así, la parte inferior y el centro llevarán la misma velocidad. Para que la bola ruede, la velocidad de la parte inferior de la bola ha de ser igual que la del centro pero en sentido contrario. Mientras la bola se deslice, el rozamiento hacia atrás aminora la velocidad del centro, así como la de la parte inferior, hasta que esta última se invierte. Cuando las velocidades se acompasan adecuadamente, comienza la rodadura.

Una combinación similar de rozamiento y velocidad altera el efecto lateral. Vista desde atrás, la parte inferior de la bola se mueve hacia la derecha, mientras que al principio el centro no se mueve ni hacia la derecha ni hacia la izquierda. El rozamiento que se opone al giro antihorario hace que éste vaya disminuyendo, a la vez que impulsa el centro de la bola hacia la izquierda. En el momento que la parte inferior gira hacia la derecha con igual velocidad que el centro hacia la izquierda, comienza la rodadura. Este cambio es simultáneo a la transición a la rodadura frontal.

Durante el deslizamiento, los rozamientos combinados que actúan sobre la bola la envían hacia la izquierda, siguiendo una trayectoria parabólica cuya curvatura depende de los valores iniciales de la velocidad de rotación y de la velocidad hacia adelante. Por ejemplo, si se lanza a mayor velocidad o con menor velocidad de rotación la curvatura disminuye. En el instante en que se inicia la rodadura, la bola abandona la trayectoria parabólica saliendo por la tangente; a partir de entonces se mueve en línea recta.



2. Rozamiento de una bola que se desliza

Para determinar el ángulo de esa rodadura rectilínea, que es también el ángulo con el que la bola se aproxima a los bolos, Hopkins y Patterson estimaron la velocidad hacia adelante y la velocidad angular comunicadas a la bola. Eligieron asimismo un valor representativo para el coeficiente de rozamiento, valor este que constituye una medida de la rugosidad de la superficie y del grado de lubricación entre la bola y suelo del callejón. En ninguno de sus cálculos el ángulo de aproximación superó los tres grados. Da la impresión de que no merece la pena tomarse la molestia de comunicar a la bola efecto lateral si sólo se consigue algo tan ridículo.

Sospeché que el ángulo resultaba pequeño sólo porque Hopkins y Patterson suponían que el coeficiente de rozamiento mantiene su valor, bajo, durante la trayectoria entera de la bola hasta llegar a los bolos. Tanteando con sus ecuaciones esperaba descubrir que si a partir del primer tercio la calle no estuviera engrasada, eso provocaría un aumento del ángulo. A lo mejor cuando la bola llegara a la porción "seca" del piso el brusco aumento del rozamiento le obligaría a tomar un ángulo de aproximación mayor.

Pero lo que descubrí me dejó perplejo: el coeficiente de rozamiento no influye en el ángulo de aproximación. Lo que determina el ángulo de aproximación es el cociente entre la velocidad hacia adelante y la velocidad angular. (El giro hacia atrás desempeña un papel intrascendente.) Así, si la velocidad de rotación es pequeña o si la velocidad hacia adelante es elevada, ese ángulo es minúsculo; mientras que si la velocidad de rotación es elevada y la velocidad hacia adelante moderadamente baja, el ángulo puede alcanzar 10 o más grados.

Aunque el coeficiente de rozamiento no influya en el ángulo de aproximación a los bolos, sí que determina en qué punto de la calle se inicia la rodadura. Con un coeficiente grande, la trayectoria inicial dibuja una parábola muy cerrada de la que la bola se aparta al poco tiempo, con lo que puede ir a parar a la izquierda del emboque. Si, por contra, el coeficiente es pequeño, la bola se separa de una parábola de curvatura suave al final de su recorrido y se pierde por la derecha del emboque. (Si la calle estuviera engrasada hasta el final, la bola llegaría incluso a los bolos antes de ponerse a rodar.) En el juego de bolos parte del éxito depende de la habilidad que uno tenga para arrojar la bola en función del coeficiente de rozamiento propio del callejón. Tal información se adquiere practicando antes de la partida y afinando los lanzamientos hasta templar la bola de modo que entre limpiamente por el emboque. La tarea no resulta fácil, pues en cada lanzamiento la bola arrastra consigo algo de grasa hacia la zona seca, alterando su coeficiente de rozamiento.

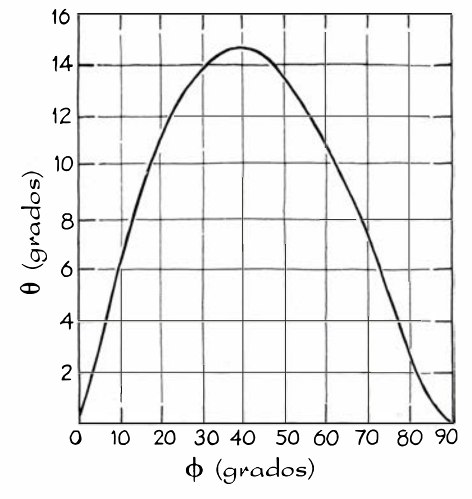
Llegados a este punto, hemos de reconocer que estos resultados no aportan nada especial. Vienen a coincidir con los consejos de los profesionales. Si la bola entra "baja" (demasiado a la derecha) o "alta" (demasiado a la izquierda), lo que hay que hacer es modificar la velocidad de lanzamiento y el efecto lateral hasta ajustar el ángulo de

aproximación. Otra posibilidad es que el jugador varíe su posición a lo ancho del callejón, con lo que la trayectoria de la bola queda desplazada hacia la derecha o la izquierda; también puede arrojarla hacia la izquierda o hacia la derecha en vez de tirar recto hacia adelante, de modo que la trayectoria sufra una rotación en torno al punto de lanzamiento.

¿En virtud de qué se produce el repentino viraje de la bola? Esta vira si se desliza desde una zona de piso engrasado hasta una zona seca. El aumento brusco del coeficiente de rozamiento acrecienta la curvatura de la parábola que describe la bola y el cambio drástico hacia la izquierda de la dirección del recorrido de la bola constituye el viraje. Ahora bien, el viraje no altera el ángulo de aproximación; con eso simplemente se consigue que la bola alcance antes ese ángulo.

Si el ángulo de aproximación de una bola lanzada con efecto lateral es de tan sólo unos tres grados, ¿aumenta algo realmente la posibilidad de hacer *strike*? Para responder a esta pregunta intenté averiguar lo que le pasa a la bola tras golpear al primer bolo. Empecé por dibujar una vista en planta de la formación de bolos valiéndome de una plantilla de círculos. Como el centro de cada bolo está a treinta centímetros del centro de los bolos contiguos, el conjunto constituye un triángulo equilátero, cuyos tres vértices forman ángulos de 60 grados. Dentro de la formación, los bolos crean triángulos equiláteros más pequeños.

Simplifiqué el choque. Supuse, en efecto, que duraba demasiado poco para que importara el rozamiento entre ambos cuerpos. (Lo mismo pasa en el billar: el rozamiento entre la bola blanca y las numeradas rara vez es digno de tenerse en cuenta.) También supuse un choque elástico (donde no se perdía energía cinética) y que no variaba la cantidad de movimiento total de los cuerpos. Resumiendo, imaginé que el choque era similar al de un disco grande de hockey sobre hielo (la bola) contra otro disco más pequeño (el bolo), encontrándose ambos sobre una pista de hielo absolutamente resbaladiza. La bola la representé mediante un círculo de diámetro doble al de los círculos que daban cuenta de los bolos; por lo demás, la representación respetaba la escala.



3. Así varía la desviación de la bola

En mi análisis intervienen especialmente dos ángulos [*véase la figura 4*]. Uno de ellos es el ángulo de aproximación; el otro, al que llamo ángulo de contacto, se extiende desde el frente del primer bolo hasta el punto donde la bola entra en contacto con él, visto desde el centro del mismo. En el momento de la colisión, el bolo recibe el impulso de una fuerza que actúa sobre la recta que une los centros del bolo y la bola. Por tanto, el bolo se mueve siguiendo una trayectoria inclinada respecto al eje longitudinal de la calle con un ángulo igual al de contacto.

A causa del choque, la bola se desvía de su trayectoria inicial y se aleja de la dirección que toma el bolo. Este ángulo de desviación (que llamaremos θ) depende del ángulo (que llamaremos ϕ) formado por el vector velocidad inicial de la bola y el vector representativo de la velocidad que se comunica al bolo. En la figura 3 se ha dibujado una curva que relaciona θ y ϕ. Curva que construí suponiendo que la masa de la bola cuadruplicaba la del bolo. Obsérvese que la máxima desviación de la bola es de poco más de 14 grados. (Gustosamente facilitaré a quien lo desee una copia del cálculo de la gráfica.)

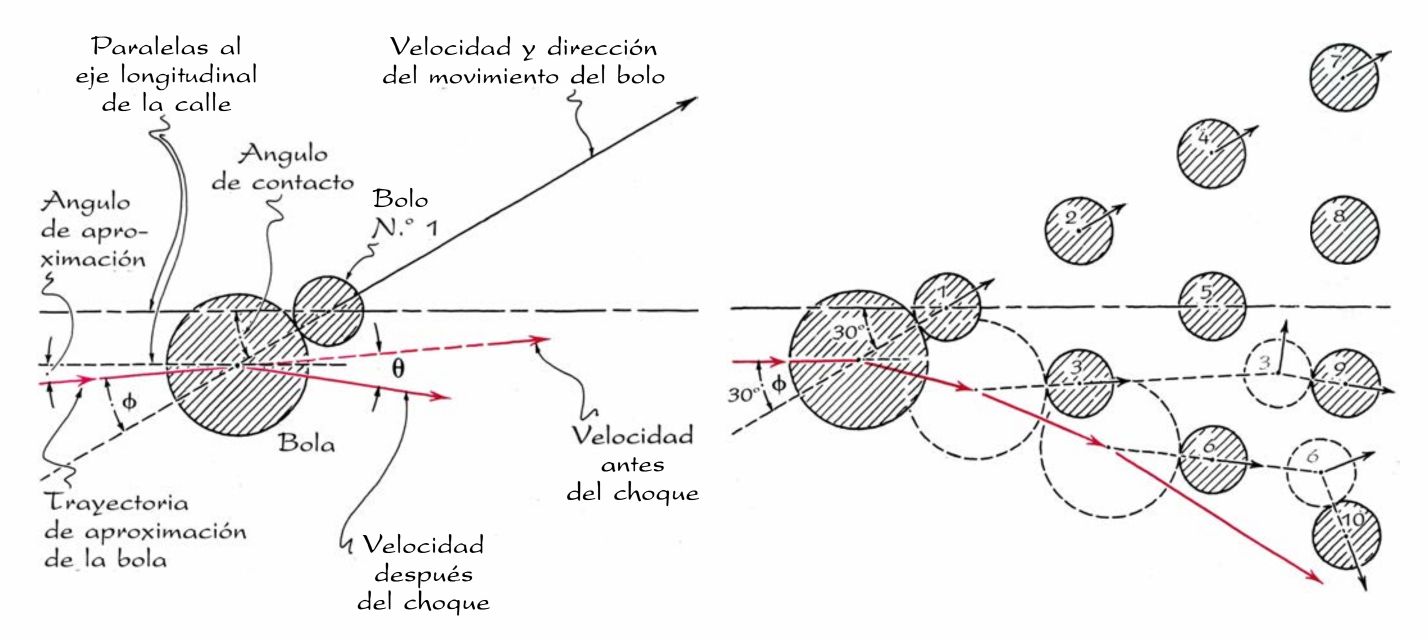
El choque entre dos bolos se reconstruye más fácilmente. En el momento de un choque entre dos bolos el segundo de éstos (en reposo en un comienzo) es impulsado según la recta que pasa por los centros de los dos. El primero se desvía en una dirección perpendicular a esa recta. (Salvo que el choque sea frontal, en cuyo caso el primer bolo se detiene.)

Provisto de mi gráfica, la plantilla y un montón de fotocopias de la formación de bolos, estudié lo que acontece cuando la bola golpea al primer bolo desde distintos ángulos de aproximación y contacto. Quien realice un análisis como éste (sea sobre el papel, como yo, o con un ordenador personal) que tenga presente que los resultados son únicamente indicativos, pues se pasan por alto muchos aspectos del proceso. Si un bolo recibe un golpe y va rebotando a lo largo de la calle, el rozamiento puede alterar su dirección. Si ya caído sigue moviéndose, puede abrirse camino durante un buen trecho tumbando otros bolos. También, al caer, puede quedar girando sobre sí mismo en torno a un eje vertical, derribando así otros bolos. Podría ocurrir que un bolo chocara con otro bolo en movimiento. Además, los inevitables errores de dibujo introducen alguna incertidumbre en la trayectoria calculada después de que un bolo haya golpeado a uno o dos más.

Para representar el recorrido de la bola a través de la formación de bolos, hay que hallar su desviación después de haber golpeado al bolo 1. Prolongando la trayectoria hasta que la bola se ponga en contacto con el bolo 3, se dibuja la bola en su punto de choque con éste. El bolo 3 se moverá en la dirección definida por la recta que une los centros de ambos. La bola se desvía alejándose del bolo, variando su dirección de movimiento según el ángulo de desviación θ. Para hallar θ en la gráfica, se mide ϕ, que es el ángulo entre la dirección que toma el bolo y la que llevaba la bola justo antes del choque. Se dibuja luego la nueva dirección de movimiento de la bola. Este proceso se repite cada vez que la bola choque con un bolo.

Los textos sobre el juego de bolos califican de perfecto aquel *strike* en que la bola toca sólo a los bolos 1, 3, 5 y 9. El bolo 1 inicia entonces una secuencia de choques frontales en la que caen los bolos 2, 4 y 7, mientras que el 3 derriba al 6, el cual a su vez derriba al 10. Tras recibir el impacto de la bola, el bolo 5 tumba al 8. La caída de los bolos a lo largo del costado izquierdo de la formación sugiere que el ángulo de contacto debe estar comprendido entre unos 20 y 40 grados, siendo de 30 grados el ángulo ideal, puesto que la hilera de bolos del lado izquierdo forma un ángulo de 30 grados con el eje de la calle. Con un ángulo de contacto comprendido entre 20 y 40 grados, mis cálculos indican que el bolo 1 sale del choque con una velocidad triple que la velocidad de salida de la bola.

Limitándome a los ángulos de contacto comprendidos en esa gama de valores, indagué acerca de la alteración del comportamiento de la bola, en función de las variaciones del ángulo de aproximación, tras derribar al bolo 1. Con este análisis esperaba poner de manifiesto si reportaba alguna ventaja



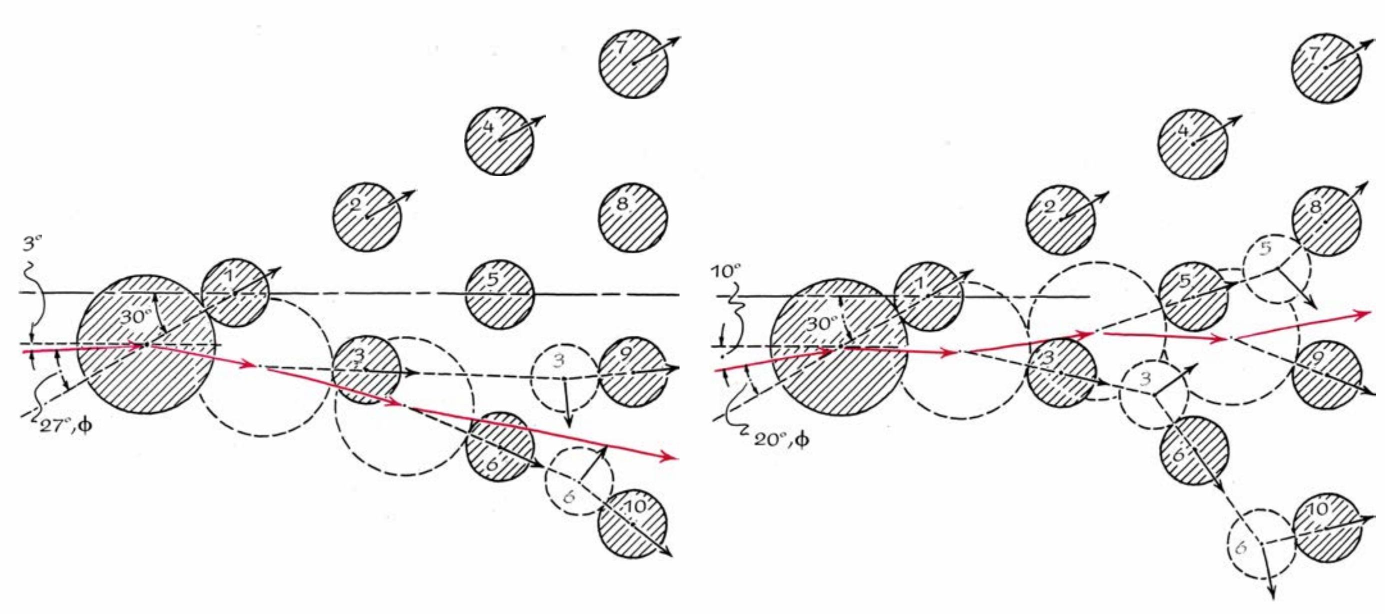
4. *Choque de la bola con el bolo 1*

5. *Trayectoria de la bola cuando el ángulo de aproximación es de cero grados*

un ángulo de aproximación no nulo. Si no fuera así, habría que concluir que imprimir efecto lateral a la bola es inútil, o bien que aquí no sirve mi experiencia en el billar, donde el leve rozamiento entre los objetos que intervienen en un choque fuerte no reviste especial importancia.

Si el ángulo de aproximación es nulo, la bola se desvía hacia la derecha de la formación cuando el ángulo de contacto es de 20 o 25 grados. Si el ángulo de contacto vale entre 30 y 40 grados, la desviación que sufre la bola tras chocar con los bolos 1 y 3 es tan grande que jamás penetrará en la formación. Cuando el ángulo de contacto es de 35 a 40 grados, la bola se desvía ostensiblemente. Según mis cálculos, se separa de la formación antes de llegar al bolo 10, que queda en pie. Los jugadores describen el fenómeno como un extraño rebote de la bola hacia la derecha al chocar contra una formación de bolos que se comporta como una pared. El inconveniente de esta gran desviación es patente; es más probable un *strike* si la bola, grande y pesada, se abre paso rompiendo la formación.

Supongamos que el ángulo de aproximación sea de tres grados. Para todo ángulo de contacto comprendido entre 20 y 40 grados, la bola penetrará en la formación por el lado derecho. Aunque el ángulo de aproximación difiera muy poco del valor que tenía en el ejemplo precedente, los resultados pueden variar de un modo radical. La ventaja de un efecto lateral que origine una aproximación inclinada es que la penetración está garantizada para todo ángulo de contacto que derribe el lado izquierdo de la formación: son jugadas de libro. Para ángulos de aproximación mayores, la penetración es aún más honda. Con un ángulo de 10 grados, se produce el *strike* prescrito en los textos. Así, pues, para hacer un *strike* clásico,



6. *Trayectoria de la bola cuando el ángulo de aproximación es de tres grados*

7. *Trayectoria para un ángulo de aproximación de 10 grados*

hay que lanzar la bola con una velocidad moderada y un fuerte efecto lateral, ajustando el lanzamiento a las condiciones del callejón hasta que la bola toque una y otra vez al bolo 1 bajo un ángulo de 30 grados. Aunque erremos un poco, la vigorosa penetración de la bola en la formación y los complicados movimientos de los bolos, que no hemos tenido en cuenta, muy probablemente darán lugar a un *strike*.

Al reconstruir, sobre el papel, los movimientos de la bola se nos presenta otra razón para no lanzar la bola en línea recta por el centro de la calle. Si la bola golpea al bolo 1 con un ángulo de contacto nulo, los bolos 7 y 10 quedarán, probablemente, en pie cuando la bola se abra paso directo por el centro de la formación. Conseguir el doblete 7-10 en la segunda tirada es hazaña casi imposible. Hay otros *spares* difíciles, pero al menos son factibles. Consideremos el de los bolos 6, 7 y 10. Según los manuales, la bola debe golpear el costado derecho del bolo 6, para enviarlo hacia el 7, y seguir ella hacia el 10. La verdad es que hallé que con un ángulo de contacto de unos 70 grados para el bolo 6, el 7 se elimina limpiamente. En realidad, el choque con el bolo 6 no tiene por qué ser tan preciso si el bolo cae y barre una buena porción de callejón.

Respecto al juego de bolos aún queda mucho por investigar a través de este sencillo procedimiento de papel y lápiz. Así, sería interesante estudiar el lanzamiento de una bola "con retroceso": en este caso la bola se acerca por alto al bolo 1 y luego se desvía hacia el emboque izquierdo, entre los bolos 1 y 2. Hay además centenares de *spares* que estudiar. ¿Cómo jugar cada uno para derribar todos los bolos?

Asimismo, ciertos detalles concernientes a la bola plantean complejas cuestiones. Tras golpear al bolo 1, la bola debe deslizar hasta que comience a rodar de nuevo. ¿De qué modo altera el rozamiento la dirección del movimiento de la bola? (Me imagino que el rozamiento reduce el ángulo de desviación.) ¿Influye en el movimiento de la bola la distribución irregular de su masa? ¿Convierte a la bola esta gran masa en un giróscopo que se opone a los cambios de dirección? Aun admitiendo que un estudio teórico del juego de bolos está sujeto a las limitaciones que imponen todas las variables que intervienen, el análisis seguirá valiendo la pena si nos ayuda a entender, siquiera aproximadamente, por qué la bola y los bolos se comportan como lo hacen.

Libros

Nerja, la formación musical, ingeniería química y Descartes

E. Aguirre, M.ª C. Rusiñol, C. Mans y J. Echevarría

LA PREHISTORIA DE LA CUEVA DE NERJA (MÁLAGA). Edición y coordinación de J. F. Jordá Pardo. Patronato de la Cueva de Nerja; Málaga, 1986.

Los prehistoriadores españoles en las últimas décadas han llegado a tenernos acostumbrados a publicaciones monográficas muy valiosas por el rigor científico y por la amplitud del campo informativo y disciplinar que abarcan. Está creándose un *monumentum* de yacimientos arqueológicos españoles bien excavados, e ilustrados de modo interdisciplinar, aun cuando en algunos se haya pasado un poco deprisa por ciertos aspectos debido a la escasez de especialistas y tal vez de medios técnicos. Dicho de paso (y aunque nadie lo ignora) la riqueza arqueológica de nuestro país es extraordinaria, y siguen siendo cortas las disponibilidades de presupuesto, por lo que se hace muy penosa su asignación y se excava y publica mucho menos de lo deseable. Por ello es muy grato dar la bienvenida a una publicación de excavaciones realizada con el apoyo de un patronato y dirigida por quien tiene experiencia y sólida formación en geología, en paleontología y en prehistoria, como es el caso de Jesús Jordá Pardo y la Cueva de Nerja.

Hacía ya años que se esperaba este trabajo, máxime cuando la Cueva de Nerja está abierta al público y es objeto de un reclamo turístico. Una de las mejores cosas que pueden decirse a la vista de esta monografía es que el Patronato de Nerja ha sabido armonizar la explotación turístico-cultural del sitio con su investigación científica.

El volumen contiene dos monografías diferentes, que se presentan como "partes". En la primera, se estudian el Paleolítico superior y el Epipaleolítico en un conjunto de artículos firmados por especialistas de las respectivas disciplinas. La segunda consta de un único artículo, firmado por M. Pellicer y P. Acosta, en que se tratan el Neolítico y el Calcolítico. En la primera, Jordá Pardo es autor de los artículos sobre el contexto geográfico, la sedimentología y estratigrafía, y la fauna malacológica, y coautor con Becares de la exposición sobre las excavaciones desarrolladas a partir de 1979. El estudio de los fósiles de Mamíferos se confió a M. Pérez Ripoll, de Aves a A. Eastham, de Quelonios a E. Jiménez y de polen a A. Guillén Oterino; J. E. Aura Tortosa analiza la ocupación magdaleniense y F. J. González-Tablas la del Epipaleolítico. J. L. Sanchidrián estudia las manifestaciones de arte. A. Jordá Cerdá se ha reservado, además de la introducción y el colofón, un breve apunte sobre las ocupaciones premagdalenienses.

Están bien estudiados y expuestos los contextos geológicos, la flora, aves y reptiles, así como las obras de arte prehistóricas. En la parte dedicada a los Mamíferos, es exagerado el papel que se consume en listas, repitiendo citas en cada nivel; esto se hubiera resuelto mejor con un cuadro, y en cambio falta estudio comparativo e interpretativo; no todas las faltas ortográficas de este trabajo pueden achacarse al transcriptor o al impresor. Es también sensible la ausencia de coordinación entre Pellicer y Boessneck en el análisis de la fauna de los niveles neolíticos y calcolíticos de Nerja: el primero y su coautora dejan una sombra de duda sobre el trabajo del zooarqueólogo alemán. Por último, resultan algo pobres de contenido e interpretación las conclusiones sobre la ocupación magdaleniense; en este mismo artículo se abusa, quizá, de lenguaje poco claro y de reducir la explicación de las figuras a las citas de éstas en el texto. En general, habría sido mejor en toda la obra disponer de leyendas más completas para las figuras, incluyendo explicación de las abreviaturas; la impresión de algunos dibujos y cuadros es defectuosa.

En fin, tenemos un par de primeras piedras, sólidas en general, para el monumento prehistórico y paleoecológico que son las bellas cavidades de Nerja. Dado que en la Sala de la Mina faltan del todo los niveles solutrenses y la representación premagdaleniense es menguada, no acabamos de consolarnos por la falta de publicación de los datos y resultados de las excavaciones de Ana María Quadra-Salcedo. Esperemos que no se hayan perdido esos datos como los esqueletos de la incendiada cátedra de antropología de Barcelona, y que un día podrán ser conocidos y publicados, por encima de las dificultades que fueren. Quedamos también a la espera del prometido estudio sobre los mamíferos, del de los nuevos fósiles humanos y, aun cuando el plazo sea más largo, de la caracterización diferencial de las facies andaluzas del Paleolítico superior. La inspiración de este equipo está en el camino, y así lo ha demostrado con una monografía netamente de vanguardia en el hasta ahora casi desconocido Paleolítico superior de España al sur de las Cordilleras Cantábrica e Ibérica. (E. A.)

LA FORMACIÓN MUSICAL DEL OÍDO, por Clemens Kuhn. Editorial Labor; Barcelona, 1988.

Se trata de un manual breve, 127 páginas en total, de ejercicios prácticos para la formación autodidacta de la audición musical. En contraposición a una audición pasiva, que no entiende lo que oye, la audición activa depende de un nivel básico de conocimientos e implica descifrar, con la mayor nitidez posible, la textura del material sonoro: ritmos, armonías, contrapuntos, temas y timbres. Ello exige una sensibilidad peculiar y una extensa formación musical. Sensibilidad que debe educarse con un enriquecimiento auditivo constante y formación que es necesario ampliar con una práctica periódica de técnicas y "artilugios" sonoros.

Esta audición activa o consciente debería formar parte de los programas de conservatorio y ser complementaria a las demás materias. En nuestros conservatorios no existe una disciplina específica que profundice en la formación auditiva, ni se explica en las asignaturas fundamentales de armonía, contrapunto o formas musicales. Apenas si recibe, en algunos pagos, un tratamiento lineal, limitada a una hora semanal en cuatro o seis meses y a unos ejercicios elementales basados en el reconocimiento de notas, relaciones interválicas y acordes de tercera y séptima. Método este que tiende a la parcialidad, prima el detalle y el "todo" musical queda diluido en una atomización de ejercicios. Ante esas limitaciones institucionales, Kuhn acentúa el valor de la formación personal y se esfuerza por suplir, con

este libro, la dependencia constante del maestro. Se invita al estudiante a descubrir el entramado musical mediante unos ejercicios que permitan el autocontrol y que excluyan la trampa fácil de lo "reconocible".

Así, el objetivo primordial de los ejercicios propuestos se centrará en potenciar y dinamizar unas cualidades básicas que todo oyente debe poseer, y en suministrar un método de análisis capaz de crear un hábito de reconocimiento e interiorización de técnicas compositivas y fenómenos sonoros que el alumno ha estudiado por separado, pero que, en el momento de la audición, aparecen de forma conjunta en un todo musical.

La memoria será la primera cualidad requerida para seguir el discurso musical. Sin embargo, a medida que aumente la duración y complejidad de este discurso se requerirá una segunda condición: la concentración, que deberá ser profunda, ganada a pequeñas dosis, atenta a los procesos rítmicos, lineales y armónicos para poder aprehender la conjunción total de planos sonoros. La estructuración de los ejercicios en pequeños fragmentos y células básicas nos parece un método acertado para elaborar una síntesis teórica y práctica. Esta descomposición de elementos será altamente positiva para la identificación sonora o comprensión auditiva; sabido es que a través de una frase o unos acordes llegamos a desentrañar el movimiento de las distintas voces, el entramado armónico y los giros cadenciales.

El método aquí propuesto para el aprendizaje auditivo se basa en prácticas sencillas: leer, escribir, tocar, oír e inventar. Familiarizarse con la grafía musical significa realizar un esfuerzo por hacer "sonar" interiormente lo que uno lee para así adentrarse en la estructura interna y en la peculiaridad musical de cada obra. Kuhn advierte que la comprensión de una partitura se conseguirá en mayor o en menor medida según la complejidad de ésta; una sonata de Mozart, por ejemplo, se podrá captar leyéndola en su conjunto, lo que no se dará en una partitura orquestal de Debussy.

Representar gráficamente los sonidos oídos es una recomendación constante del autor, que conduce a una mayor precisión auditiva y una seguridad mayor en el momento del análisis. Sólo esporádicamente propone la invención, pero siempre sujeta a un estricto autocontrol y partiendo de esquemas predeterminados.

A la abstracción de los sonidos sigue la interpretación como forma de percepción auditiva, sensorial e intelectual. Se da un valor destacado al canto, ya que la ejecución propia favorece la representación interna. El piano aparece como instrumento idóneo para sonoridades simultáneas; ahora bien, su versatilidad puede mermar la imaginación o inducir a la pereza. El último objetivo se fija en la audición controlada. Supondrá potenciar la capacidad asociativa, percibir por medio de relaciones para, sólo después, volver a los detalles.

Los ejercicios se estructuran en apartados, desde la simple relación interválica hasta las formas polifónicas más complejas. En ese orden, se parte de interesantes prácticas vocálicas y combinatorias para captar las relaciones interválicas, base del lenguaje musical, en su sentido ascendente y descendente. Insiste en el procedimiento reseñado: leer lo anotado, representarlo interiormente, escribirlo y controlarlo con el instrumeno.

La simultaneidad de sonidos ha sido, desde siempre, algo complicado, difícilmente asimilable en una primera lectura y, menos todavía, en una primera audición. Para su identificación correcta es necesario partir de esquemas sencillos y pasar, de forma progresiva, a la sonoridad de conjuntos, asociando las funciones que éstos ejercen en el entramado armónico. Kuhn, consciente de la dificultad armónica, le dedica un amplio espacio, que lo divide en dos secciones: la primera trata del acorde tríada; la segunda, el acorde de séptima en profundidad y, brevemente, el de novena. (Acordes pertenecientes a la armonía clásica, aunque sin mencionar la revolución armónica iniciada con el último romanticismo, ni el acorde cuatríada de Shonberg.) Se centra en la aprehensión sonora del acorde aislado y en su funcionalidad en los procesos armónicos y se busca captar, reconocer e interiorizar la sonoridad completa del acorde y percibir, más tarde, sus combinaciones dentro de series, progresiones, cadencias...

La conclusión de ese capítulo con un análisis de la partitura esclarecería el sentido y el objetivo de los ejercicios realizados separadamente. Hubiera sido muy útil analizar la crisis de la tonalidad y el tránsito de la armonía clásica a la moderna, pero estos temas quedan excluidos al limitarse al período clásico. Omisiones que no empañan su valiosa exposición de una funcionalidad diferente de los tradicionales ejercicios expuestos en innumerables tratados y manuales desde que Rameau publicara el primero en 1722. Además, esta exclusión de temas y prácticas contemporáneas no se repite en el apartado melódico. Menos problemática, la linealidad melódica permite tratar las melodías más intrincadas de nuestro siglo e incluso las construidas sobre la serie dodecafónica. Kuhn puede exponer un buen número de ejemplos comparativos y técnicas combinatorias.

Para descifrar el entramado polifónico sigue un desarrollo evolutivo. Incluye fragmentos vocales de composiciones clásicas y ofrece modernos ejemplos de polifonía instrumental. Aconseja no dividir ni descomponer la simultaneidad de las voces en las frases polifónicas, trampa donde sucumben con facilidad los intrumentalistas melódicos llevados por su instinto lineal de tocar a una voz.

En el apartado dedicado a la homofonía ofrece un amplio repertorio de esquemas en diversos contextos musicales, desde las producciones clásicas hasta las contemporáneas. Este recorrido histórico, muy ilustrativo, podría haberse extendido con técnicas comparativas que destacaran las distintas combinaciones y mutaciones que se dan en los diferentes períodos y estilos.

Una sección que aborde la lectura, análisis y audición de partituras resulta indispensable, una vez expuestas las principales técnicas que conforman el lenguaje musical. En esa línea, el libro incorpora un apartado final consagrado a la lectura y audición de partituras por separado. Con suficientes ejemplos gráficos, el autor intenta que el alumno se autodirija de forma consciente, utilizando las técnicas que ya ha practicado anteriormente. Muy breve y de escaso contenido didáctico nos parece, sin embargo, lo escrito sobre el análisis de partitura. Util y coherente resulta la lista de obras básicas que se aconsejan para que el alumno cultive un trato intermitente con partituras sirviéndose del magnetófono.

Sorprende la ausencia de análisis y prácticas sobre dos componentes básicos del sonido: ritmo y timbre. No se da ninguna referencia tímbrica ni tampoco se señala la bibliografía y discografía existente. El autor justifica la omisión del ritmo señalando su dificultad para un estudio personalizado.

Preferencias del crítico aparte, hay razones de peso para celebrar la aparición de este manual de ejercicios. Cumple el objetivo propuesto de incentivar la audición consciente adaptándola a las condiciones de un estudio individual. Su alto contenido didáctico facilita la interiorización de unas prác-

ticas controladas por una progresión constante de lo "fácil" a lo "más difícil" y ayuda a la creación personal moviendo al lector a elegir nuevos ejemplos y a buscar nuevas direcciones. La originalidad de algunos ejercicios abre nuevas perspectivas a la experimentación pedagógica y debe incluirse en la programación del profesor. La traducción del libro es correcta y la redacción en castellano se ajusta a los términos precisos para la comprensión del tema. La edición y el formato responde a las exigencias de un manual de bolsillo. (M.ª C. R.)

INGENIERÍA QUÍMICA 5. TRANSFERENCIA DE MATERIA, 1 PARTE, por E. Costa Novella, con la colaboración de J. L. Sotelo Sancho, G. Calleja Pardo, G. Ovejero Escudero, A. de Lucas Martínez, J. Aguado Alonso y M. A. Uguina Zamorano. Alhambra Universidad; Madrid, 1988.

El comentario a un volumen de una obra que, en su versión final, alcanzará siete no es fácil de realizar sin mezclar opiniones acerca del conjunto ya publicado. Ello es aún más arduo en los casos en que, como el que nos ocupa, la obra tiene una voluntad globalizadora y su división en volúmenes es obligada por las dimensiones físicas que alcanza, pero no tanto por los contenidos. Por ello, el comentario que sigue es más sobre distintos capítulos que sobre el libro como tal.

De acuerdo con una clásica —y opinable— ordenación temática este volumen inicia el tratamiento de la transferencia de materia una vez se han presentado en volúmenes anteriores los conceptos generales de la ingeniería química (vol. 1), los fenómenos de transporte (vol. 2), el flujo de fluidos (vol. 3) y la transmisión de calor (vol. 4). "Tradicionalmente el estudio de los principios que regulan la transferencia de materia es característico de la Ingeniería Química, a diferencia del correspondiente a los que regulan los transportes de cantidad de movimiento y energía, cuyas aplicaciones son comunes a varias ramas de la Ingeniería", afirman los autores. A esta parte específica le dedicarán tres volúmenes de su obra.

El que reseñamos lo forman capítulos de muy diferente entidad. El primero, titulado "Generalidades", introduce los mecanismos y operaciones de transferencia de materia. El siguiente, "Transferencia de materia por difusión", presenta las soluciones matemáticas a distintos modelos físicos para los que puede suponerse que la transferencia tiene lugar de forma molecular, sin que la turbulencia contribuya al flujo de materia de un punto a otro del sistema. Apoya sus fundamentos en el volumen 2 de la obra, para desarrollar las ecuaciones que representan los modelos físicos. Estas son, en muchos casos, formalmente análogas a las que aparecen en el tratamiento de la transferencia de energía a través de sólidos. Su resolución analítica o numérica es también análoga, por lo que la primera parte de este capítulo puede parecer algo reiterativa de otras del mismo capítulo del volumen 4. La difusión en mezclas binarias y la difusión con reacción química se estudian con detalle. Una limitación común a todo el tema es la necesidad de realizar hipótesis simplificadoras en los modelos físicos de los ejemplos propuestos, para poder posteriormente resolver sin excesivas dificultades los modelos matemáticos. Tales hipótesis restringen considerablemente, por lo común, la aplicabilidad de los resultados y dan una imagen "academicista" a todo el capítulo, imagen muy difícil de evitar, como todos los autores de textos de esta temática conocen, y conocemos.

Los tres siguientes capítulos son absolutamente básicos en el currículum de un ingeniero químico. Son ejemplos de las cuestiones que "deberían saberse ya" de los cursos de termodinámica realizados a lo largo de los estudios. Y son también ejemplos de los temas que "es seguro que no se dominan". El capítulo 3, "Equilibrio entre fases", pone especial énfasis en los métodos de cálculo de los coeficientes de actividad en mezclas gaseosas, líquidas o sólidas. Se describen así con cierto detalle métodos como las ecuaciones de Redlich-Kwong, Wilson, NRTL, UNIQUAC, o métodos de grupo como ASOG o UNIFAC. La obtención y descripción de diagramas de equilibrio binarios y multicomponentes es también extensa. El cálculo de entalpías de las mezclas es realizado en el capítulo 4. Los resultados obtenidos serán imprescindibles en operaciones tales como la evaporación, cristalización, rectificación, adsorción y otras. El capítulo 5, "Temperaturas de burbuja y rocío. Destilación súbita", tiene un título suficientemente descriptivo y concede especial importancia a las mezclas multicomponentes.

Los dos últimos capítulos (6: "Cascadas de etapas de contacto" y 7: "Cascada de etapas de equilibrio: Variables de diseño y métodos de cálculo generales") introducen el cálculo y diseño general, independientemente de la operación unitaria concreta, de los sistemas de etapas con contacto discontinuo, alcanzándose el equilibrio en cada

una de las etapas, idealmente hablando, con enfoque globalizador. Tras una descripción general se entra en el cálculo del número de variables de diseño y el cálculo del número de etapas ideales necesarias para una separación dada. No se detiene en la estimación de eficacias de etapa –aspecto quizá tratado en el próximo volumen– ni en las operaciones de contacto continuo, que se han abordado parcialmente en el volumen 2, capítulo 6, al estudiar los coeficientes de transporte individuales y globales.

Todos los capítulos incluyen un apartado de bibliografía, a excepción del 6, con un total de más de cien referencias. Son especialmente interesantes las citas de los artículos originales de diversos pioneros: por ejemplo, Margules (1895) –que no es la más antigua de la obra– o Lewis (1932). En cambio, la bibliografía más reciente no está tan bien representada. La densa nomenclatura necesaria en este tipo de textos se ordena al final de cada uno de los capítulos, donde quizá habría podido indicarse las dimensiones de cada variable.

Se ofrecen a lo largo del texto y al final de cada uno de los capítulos problemas resueltos (76) o sólo planteados (99), de muy distinta complejidad matemática. Los métodos matemáticos de resolución de las ecuaciones que aparecen se describen también y se apunta en diversos momentos la necesidad de la resolución de ecuaciones por cálculo numérico mediante ordenador. Este aspecto debería desarrollarse con mayor amplitud.

Obra útil y bien editada, su público es el de estudiantes de ingeniería química de facultades de ciencias o de química y escuelas superiores de ingenieros industriales. Es deseo de los autores que sea también de utilidad como obra de consulta para quienes ejercen su actividad profesional o docente fuera de las universidades. (C. M.)

La Filosofía de la Ciencia de Descartes, por Desmond M. Clarke. Alianza Editorial; Madrid, 1986.

Tradicionalmente se ha opuesto el racionalismo al empirismo en los manuales de historia de la filosofía. En función de las tesis mantenidas en el *Discurso del método*, en las *Meditaciones metafísicas*, en *Los principios de la filosofía* así como en su obra póstuma, *Reglas para la dirección del espíritu*, Descartes ha sido adscrito a la corriente racionalista y, por consiguiente, su pensamiento ha sido interpretado por oposición al empirismo.

Esta obra de D. M. Clarke mantiene una tesis inusual, ya enunciada por Laporte en 1945, pero ahora argumentada exhaustivamente a partir de un profundo conocimiento de los textos cartesianos, y en particular de su correspondencia. Para ello se utiliza la edición de Adam-Tannery de las *Obras Completas* de Descartes, en la cual se incluyen numerosos documentos sobre sus trabajos científicos, así como sus respuestas y disputas sobre cuestiones metodológicas con sus coetáneos. Mostrando un amplio conocimiento de la literatura especializada sobre Descartes, de la cual se incluye una extensa bibliografía, Clarke va a mantener a lo largo de todo este libro una tesis aparentemente sorprendente, por ir contra uno de los tópicos más acendrados en la historia de la filosofía. "Descartes es, a lo largo de toda su carrera, un empirista" –se afirma taxativamente en la pág. 29.

La estrategia seguida para defender esta tesis es clara. Para hablar de la metodología científica cartesiana no hay que tomar como punto de partida sus escritos filosóficos, ni siquiera los propiamente metodológicos, como el *Discurso del método* o las *Regulae*. Se trata de leer la obra conservada de Descartes "como la producción de un científico práctico que por desgracia escribió unos breves ensayos de cierta importancia filosófica" (p. 16). Frente a la enorme difusión que han tenido sus obras filosóficas, los escritos científicos de Descartes han quedado arrumbados en un ámbito aparentemente secundario: el de la historia de la ciencia. Unicamente la *Geometría* de 1637, los *Meteoros* y la *Dióptrica* han sido reeditados con una cierta frecuencia, y ello en buena medida porque aparecieron en vida de su autor en el mismo volumen del *Discurso del método*, del cual serían una especie de aplicación práctica. Sus investigaciones sobre anatomía, química, fisiología, etc., no gozaron de la misma fortuna. E incluso muchas de sus tesis científicas fueron mejoradas por sus contemporáneos o sucesores, motivo por el cual ni siquiera para los historiadores de la ciencia presentaron un excesivo interés.

Ahora bien, si se concibe a Descartes como un científico, antes que nada, y ello independientemente del mayor o menor éxito histórico de sus teorías (en el caso de la *Geometría* éste fue incuestionable), entonces hay que indagar su metodología en su propia labor como investigador científico, y no en textos de divulgación dirigidos al gran público y, por otra parte, relativamente prudentes a la hora de confrontarse con la metodología imperante en su tiempo, de inspiración aristotélica y escolástica. "Debemos leer su obra como él

mismo nos propone: como la de un científico práctico que también se interesó por cuestiones metodológicas, teológicas y metafísicas" –afirma Clarke en la "Introducción" (p. 20). En lugar de extrapolar sus ideas sobre el método científico a partir de los dos libros de Descartes al respecto, que Clarke considera particularmente opacos, es preferible interpretarla en la forma más consistente posible con su práctica científica real, a la cual dedicó, como es sabido, muchísimo tiempo a lo largo de su vida.

Así planteada, la obra de Clarke retoma los problemas clásicos del pensamiento cartesiano desde una nueva perspectiva. Los capítulos 2 y 3, por ejemplo, están dedicados a estudiar las distintas maneras en que Descartes contrapone la experiencia y la razón. La conclusión final es innovadora. Aparentemente, Descartes insiste en muchos de sus escritos en que los dictámenes de la razón siempre han de ser preferibles a la evidencia empírica. Pero el propio concepto de razón está profundamente ligado a la experiencia. Los textos claves, en base a los cuales cabe hablar, según Clarke, de la contraposición propiamente cartesiana entre experiencia y razón, están en las Respuestas al sexto bloque de Objeciones a sus *Meditaciones metafísicas* y en el artículo final de la primera parte de los *Principios*: allí se afirma la razón madura, cuyos juicios surgen de numerosas experiencias sometidas a crítica por el paso de los años, frente a la inmediatez de los sentidos, que suele suscitar irreflexivos juicios en la infancia y en la juventud. La oposición entre razón y experiencia es pues, para Clarke, la contraposición "entre dos tipos de juicio, ambos igual e inevitablemente basados en la evidencia empírica" (p. 86). Los "sentidos" de los que habla Descartes dan lugar a juicios espontáneos y acríticos; pero hay otra forma de juicio, más razonable, que ya no sólo atiende a la experiencia empírica, sino a una empeiría que ya ha sido mediatizada por las tentativas de explicación científica de la misma. Los juicios que provienen de la razón, y no sólo de los sentidos, brotan de la interrelación observación-teoría, como dirían los filósofos de la ciencia del siglo XX.

Asimismo, en el tema de la explicación científica (cap. 5) y en el de la confirmación de teorías (cap. 6) Descartes se revela, salvando las distancias históricas, como un pensador próximo a la epistemología científica moderna. Clarke insiste ampliamente en el carácter hipotético-deductivo de las investigaciones cartesianas en física, en meteorología, en medicina y en otras varias disciplinas científicas. Hay que enunciar hipótesis y proponer modelos, que luego han de ser contrastados empíricamente, independientemente de que sólo habrá al final una única forma de explicación científica de los fenómenos. Descartes rechaza el esencialismo y las formas escolásticas por no ser explicativas. Una explicación científica adecuada debe ser capaz de concretar el mecanismo real mediante el cual el efecto es resultado de una causa (p. 123). Alejado del convencionalismo, pese a que en algunos textos hace alusiones relativamente elogiosas a la tradición vigente en su tiempo (Galileo y Bellarmino estaban muy próximos) de salvar los fenómenos como el objetivo de la ciencia, la explicación científica permanece para Descartes en el marco del binomio causa/efecto: su noción de explicación a priori ha de ser entendida asimismo en estos términos, sin proyectar sobre ella la ulterior distinción kantiana. Profundamente empirista como científico, de afirmar algo sobre Descartes en términos kantianos habría que decir que "Descartes practica dos métodos muy distintos en su ciencia, uno metafísico y a priori y otro experimental e hipotético" (pp. 24-25). Sin embargo, estos dos métodos se articulan perfectamente, tanto en su teoría como en su práctica científica: "el papel de las explicaciones hipotéticas es rellenar el hueco existente entre los principios básicos, que están establecidos en forma cierta, y la descripción de fenómenos físicos particulares, que son conocidos por la experiencia sin ningún problema" (p. 210). Los principios de la física, como los de cualquier otra ciencia, han de estar metafísicamente fundados. Pero las teorías científicas han de explicar los fenómenos empíricos, adecuando las consecuencias que se derivan de ellas a las observaciones de los hechos. El método hipotético-deductivo proporciona el enlace entre estos ámbitos, el de la certeza racional y el de la constatación empírica.

Descartes conserva así una fuerte influencia aristotélica, sobre todo en dos cuestiones metodológicamente importantes. Siguiendo en esto a Ernan McMullin, Clarke afirma que "Descartes, el campeón de los anti-aristotélicos, está influido de forma importante, en su concepción del conocimiento científico, por el ideal aristotélico de demostración y certeza" (pp. 206-207). Un enunciado científico ha de ser cierto, más que verdadero, porque deriva de los principios primeros, que son conocidos por intuición, explorando el mundo de las ideas inserto en el alma humana. Aun no aceptando la teoría metafísica de las esencias, que son sustituidas por las propiedades observables como criterio de evidencia para las cuestiones de hecho, en lo que respecta a la intuición de los principios primeros Descartes sigue siendo un cualificado aristotélico, concluye Clark (p. 207). Asimismo, Descartes se muestra reticente con respecto a la experimentación científica, cuyos resultados son muy difíciles de interpretar: la propia complejidad de la realidad física, la multiplicidad de factores que inciden en un experimento y la necesidad de poseer una previa experiencia teórica y técnica para analizar los resultados experimentales, hacen que las conclusiones derivadas de esta metodología sean para Descartes, cuando menos, inciertas. Siendo la certeza el valor epistemológico principal de su filosofía de la ciencia, preferirá la experiencia ordinaria a la experimentación científica, siguiendo en ello de nuevo a Aristóteles. "En este sentido, Descartes es un empirista ingenuo" (p. 209).

Así concluye esta obra de Clarke, comparando a Descartes con Galileo, en tanto críticos del aristotelismo en cuestiones fundamentales, pero aceptando todavía algunas de las tesis centrales del Estagirita con respecto al conocimiento científico. Dos apéndices, uno sobre la deducción y otro sobre las reglas del impacto de la dinámica, completan esta obra, magníficamente traducida por Eloy Rada, y que constituye una importante aportación a los estudios cartesianos, en la medida en que, independientemente de algunas exageraciones y minusvaloraciones del papel de las ideas innatas en el cartesianismo, supone un giro en los estudios de la filosofía cartesiana de la ciencia. Al poner el acento sobre la actividad de Descartes como científico, más que en sus tesis filosóficas, Clarke desarrolla una interesante relectura de los textos de Descartes, resucitando aspectos de sus obras apenas conocidos por los historiadores de la filosofía, e incluso por los de la ciencia. (J. E.)

ERRATUM

Sustitúyase en el número 139, correspondiente al mes de abril de 1988, la línea 12 del segundo párrafo de la página 74 por la siguiente:

por ejemplo, $f(x^2)$, $f(x^3)$ o $f(x^4)$. El "or-

Bibliografía

Los lectores interesados en una mayor profundización de los temas expuestos pueden consultar los trabajos siguientes:

EL VALLESIENSE

THE AGE OF MAMMALS. Björn Kurtén. Weidenfeld and Nicolson, 1971.

NEW PONGIDS FROM THE MIOCENE OF VALLÈS PENEDÈS BASIN (CATALONIA, SPAIN). Miguel Crusafont y Juana María Golpe en *Journal of Human Evolution*, vol. 2, págs. 17-23; 1973.

BEARS AND BEAR-DOGS FROM THE VALLESIAN OF THE VALLÈS-PENEDÈS BASIN, SPAIN. Miguel Crusafont y Björn Kurtén en *Acta Zoologica Fennica*, vol. 144, págs. 1-29; 1976.

MAMMAL DISTRIBUTION DYNAMICS IN THE EASTERN MARGIN OF THE IBERIAN PENINSULA DURING THE MIOCENE. Jordi Agustí, Salvador Moyà y Josep Gibert en *Paleobiologie continentale*, vol. 14, n.° 2, págs. 33-46; 1984.

THE VALLESIAN IN THE TYPE AREA. Salvador Moyà y Jordi Agustí en *Annal. Institut. Geolog. Public. Hungar.*, vol. 70, págs. 93-100; 1987.

GRAVEDAD Y ANTIMATERIA

EXPERIMENTS TO MEASURE THE GRAVITATIONAL ACCELERATION OF ANTIMATTER. T. Goldman y Michael Martin Nieto en *Physics Letters*, vol. 112B, n.° 6, págs. 437-440; 27 de mayo de 1982.

ELEMENTARY PARTICLES AND THE LAWS OF PHYSICS (THE 1986 DIRAC MEMORIAL LECTURES). Richard P. Feynman. Cambridge University Press, 1987.

GEOPHYSICS AND THE LAW OF GRAVITY. F. D. Stacey, G. J. Tuck, G. I. Moore, S. C. Holding, B. D. Goodwin y R. Zhou en *Reviews of Modern Physics*, vol. 59, n.° 1, págs. 157-174; enero, 1987.

ANTICUERPOS CATALITICOS

ENZYMATIC CATALYSIS AND TRANSITION-STATE THEORY. Gustav E. Lienhard en *Science*, vol. 180, n.° 4082, págs. 149-154; 13 de abril de 1973.

TRANSITION STATES IN BIOCHEMICAL PROCESSES. Dirigido por Richard D. Gandour y Richard L. Schowen. Plenum Press, 1978.

ENZYME STRUCTURE AND MECHANISM. Alan Fersht, W. H. Freeman and Company, 1985.

CATALYTIC ANTIBODIES. Alfonso Tramontano, Kim D. Janda y Richard A. Lerner en *Science*, vol. 234, n.° 4783, págs. 1566-1570; 19 de diciembre de 1986.

A STEREOSPECIFIC CYCLIZATION CATALYZED BY AN ANTIBODY. Andrew D. Napper, Stephen J. Benkovic, Alfonso Tramontano y Richard A. Lerner en *Science*, vol. 237, n.° 4818, págs. 1041-1043; 28 de agosto de 1987.

GRUAS DE CONSTRUCCION

USA CRANE MARKET SURVEY. En *Cranes Today*, n.° 144, págs. 21-56; agosto, 1985.

WHEELS OF POWER. En *Cranes Today*, n.° 150, págs. 53-54; marzo, 1986.

TRAVELLING CRANES ON THE HIGHWAY. En *Transportation Engineer*, vol. 34, n.° 3, págs. 39-45; mayo-junio, 1987.

LAS MANCHAS DEL LEOPARDO

A PRE-PATTERN FORMATION MECHANISM FOR ANIMAL COAT MARKINGS. J. D. Murray en *Journal of Theoretical Biology*, vol. 88, n.° 1, págs. 161-199; 1981.

ON PATTERN FORMATION MECHANISMS FOR LEPIDOPTERAN WING PATTERNS AND MAMMALIAN COAT PATTERNS. J. D. Murray en *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series B*, vol. 295, n.° 1078, págs. 473-496; 7 de octubre de 1981.

A NEW APPROACH TO THE GENERATION OF PATTERN AND FORM IN EMBRYOLOGY. J. D. Murray y P. K. Maini en *Science Progress*, vol. 70, n.° 280, parte 4.ª, págs. 539-553; 1986.

OBESIDAD Y FERTILIDAD

MENSTRUAL CYCLES: FATNESS AS A DETERMINANT OF MINIMUM WEIGHT FOR HEIGHT NECESSARY FOR THEIR MAINTENANCE OR ONSET. Rose E. Frisch y Janet W. McArthur en *Science*, vol. 185, n.° 4155, págs. 949-951; 13 de septiembre de 1974.

HYPOTHALAMIC DYSFUNCTION IN SECONDARY AMENORRHEA ASSOCIATED WITH SIMPLE WEIGHT LOSS. Robert A. Vigersky, Arnold E. Andersen, Ronald H. Thompson y D. Lynn Loriaux en *The New England Journal of Medicine*, vol. 297, n.° 21, págs. 1141-1145; 24 de noviembre de 1977.

POPULATION, FOOD INTAKE, AND FERTILITY. Rose E. Frisch en *Science*, vol. 199, n.° 4324, págs. 22-30; 6 de enero de 1978.

EFFECTS OF PHYSICAL ACTIVITY ON REPRODUCTIVE FUNCTION AND DEVELOPMENT IN MALES. Stephen R. Wall y David C. Cumming en *Seminars in Reproductive Endocrinology*, vol. 3, n.° 1, págs. 65-80; 1985.

FATNESS, MENARCHE, AND FEMALE FERTILITY, Rose E. Frisch en *Perspectives in Biology and Medicine*, vol. 28, n.° 4, págs. 611-633; 1985.

EL DISPOSITIVO DE EFECTO CUANTICO, ¿TRANSISTOR DEL MAÑANA?

REPORT ARTIFICIALLY STRUCTURED MATERIALS. National Research Council. National Academy Press, 1985.

PROSPECTS FOR QUANTUM INTEGRATED CIRCUITS. R. T. Bate, G. A. Frazier, W. R. Frensley, J. W. Lee y M. A. Reed en *Proceedings of the SPIE* (International Society for Optical Engineering), vol. 792, págs. 26-35; 1987

OBSERVATION OF DISCRETE ELECTRONIC STATES IN A ZERO-DIMENSIONAL SEMICONDUCTOR NANOSTRUCTURE. M. A. Reed, J. N. Randall, R. J. Aggarwall, R. J. Matyi, T. M. Moore y A. E. Wetsel en *Physical Review Letters*, en prensa.

EL PUERTO ROMANO DE COSA

ANCIENT TRADE AND SOCIETY. Lionel Casson. Wayne State University Press, 1984.

GREEK AND ROMAN MECHANICAL WATER-LIFTING DEVICES: THE HISTORY OF A TECHNOLOGY. John P. Oleson. University of Toronto Press, 1984.

THE ROMAN PORT AND FISHERY OF COSA: A CENTER OF ANCIENT TRADE. Anna M. McCann et al. Princeton University Press, 1985.

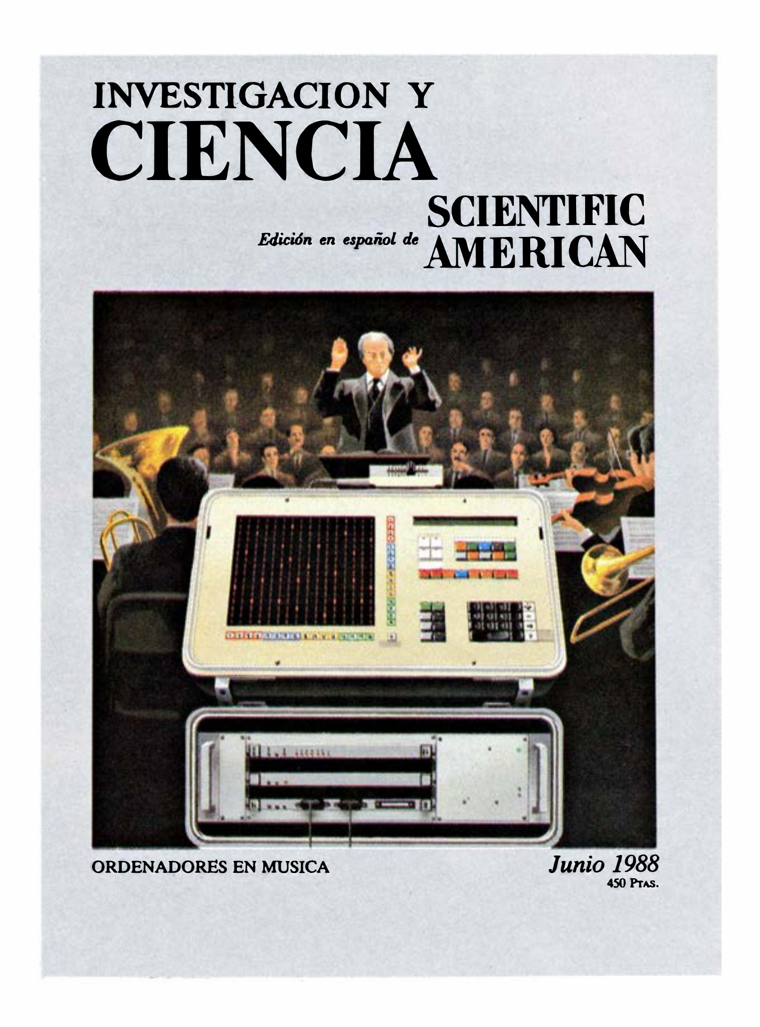
JUEGOS DE ORDENADOR

MICROCOMPUTER DISPLAYS, GRAPHICS, AND ANIMATION. Bruce A. Arwick. Prentice-Hall, Inc., 1985.

TALLER Y LABORATORIO

BOWLING FRAMES: PATHS OF A BOWLING BALL. D. C. Hopkins y J. D. Patterson en *American Journal of Physics*, vol. 45, n.° 3, págs. 263-266; marzo, 1977.

Seguiremos explorando los campos del conocimiento



LOS ORDENADORES EN LA CREACION MUSICAL, por Pierre Boulez y Andrew Gerzso
Sintetizan sonidos que no pueden reproducir los instrumentos tradicionales. La colaboración entre el compositor y los técnicos permite integrar ambas variedades sonoras en una misma pieza musical.

LO PROPIO, LO AJENO Y LA AUTOINMUNIDAD, por Irun R. Cohen
La autoinmunidad, en la que el organismo, confundido, ataca sus propios tejidos, es un fenómeno complejo. El reconocimiento de lo propio constituye el núcleo de la salud y de ciertas enfermedades.

EL PARADIGMA DE LA MEMBRANA Y LOS AGUJEROS NEGROS, por Richard H. Price y Kip S. Thorne
¿Cómo abordar la naturaleza astrofísica de los agujeros negros? Los autores los asocian a superficies esferoidales formadas por una delgada membrana conductora de la electricidad.

REACCIONES QUIMICAS Y HACES MOLECULARES, por Angel González Ureña
Los estudios llevados a cabo con cruces de haces moleculares e interacciones entre un láser y un haz molecular permiten conocer mejor las reacciones químicas, la rotura de las moléculas y su formación.

CONMUTADORES LUMINOSOS DE GENES VEGETALES, por Phyllis B. Moses y Nam-Hai Chua
¿Cómo guía la luz solar el crecimiento de las plántulas? Se han descubierto segmentos de ADN que responden a la energía luminosa y activan genes que intervienen en el desarrollo de los vegetales.

EL COMPORTAMIENTO DE LAS BALLENAS, por Bernd Würsig
Esos mamíferos marinos exhiben conductas sociales y alimentarias que recuerdan las de los herbívoros terrestres de los que evolucionaron hace unos 55 millones de años.

LOS POLIPOS DE TREMBLEY, por Howard M. Lenhoff y Sylvia G. Lenhoff
Los elegantes estudios realizados con hidras por Abraham Trembley a mediados del siglo XVIII marcaron el alba de la zoología experimental. Pese a ello, pocos biólogos conocen bien sus trabajos.

LOS EFECTOS DEL ESPIN EN LOS GASES, por Franck Laloë y Jack H. Freed
Al modificarse el momento angular de espín de ciertos núcleos atómicos se alteran algunas propiedades macroscópicas de los gases, por ejemplo, la facilidad con que conducen el calor.

